

Département de géographie et télédétection
Faculté des lettres et des sciences humaines
Université de Sherbrooke

**L'IDENTIFICATION DES CLASSES DE TEXTURE DE SOLS NUS
PAR L'ANALYSE DU COEFFICIENT DE RÉTRODIFFUSION
D'UN RADAR À ANTENNE SYNTHÉTIQUE**

BIBLIOTHÈQUE U.S.

Par
Pierre Vincent, 1955
I-1719

Mémoire présenté pour l'obtention du grade
Maître ès sciences (M.Sc.) en géographie (télédétection)

3 novembre, 1999

Directeur de recherche: Hugh Gwyn

Membres du jury:

Ferdinand Bonn (Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke)

Yves Crevier (Radarsat International Inc.)

Résumé

Il existe une forte corrélation entre l'humidité du sol des cinq premiers centimètres et la rétrodiffusion radar en bande C. La valeur de la constante diélectrique diffère entre deux classes de texture de sols aux mêmes conditions d'humidité volumique. L'objectif principal de cette recherche est de démontrer expérimentalement, par télédétection radar, la relation des classes de texture de sols avec le coefficient de rétrodiffusion à partir de données radar et de terrain. La texture d'un sol et le coefficient rétrodiffusé radar sont reliés et ce lien est plus apparent dans des conditions d'humidité moyenne du sol.

Cette étude a pour but de comparer la valeur du signal rétrodiffusé en bande C pour deux classes de texture en condition de sol nu, à des angles d'incidence entre 45° et 70° et suivant les paramètres physiques des cinq premiers centimètres de sol sur chaque site d'échantillonnage. La superficie de la zone étudiée couvre 7 km par 11 km dans un secteur agricole situé près de la municipalité de Woodstock, Nouveau Brunswick. Le signal rétrodiffusé est représenté par la valeur calculée σ°_{HH} du modèle de petite perturbation (SPM) et par la valeur logarithmique du niveau de gris au carré ($NG^2(dB)$) de l'image radar. Les analyses quantitatives furent effectuées à partir des données radar et de terrain, triées pour chaque site d'échantillonnage au sol avec des tailles de fenêtre d'échantillonnage de pixels de 11 X 11. Les textures de sols sont exprimées par les valeurs de constante diélectrique du modèle d'Hallikainen, intégrées dans le facteur de réflexion ρ_{HH} . En normalisant l'influence de la rugosité de surface par la relation $K = NG^2(dB)/\rho_{HH}$, à partir des données radar et de terrain, les effets des textures de sols sont ainsi favorisés vis-à-vis les valeurs aux pixels du signal rétrodiffusé de l'image radar. L'inversion du modèle $NG^2(dB)K$ a permis la reclassification correcte de la majorité des sites sur les parcelles de sol nu, suivant leur classe respective de texture de sol. La persistance des valeurs plus élevées du signal rétrodiffusé sur les sols de texture loam, comparativement aux sols de texture loam limoneux aux mêmes conditions d'humidité MvH_2O inférieures à 30%, est une caractéristique qui demeure conforme suivant les analyses quantitatives d'un modèle physique théorique (SPM) et d'un modèle empirique expérimental ($NG^2(dB)K$).

Table des matières

Liste des annexes	III
Liste des figures	IV
Liste des tableaux	VIII
Remerciements	IX
1. Introduction	
1.1 Identification des besoins	1
1.2 Potentiel de la télédétection radar	2
1.3 La nature de la mesure	3
1.4 Problématique	6
1.5 Objectifs	8
1.6 Hypothèse	8
1.7 Site d'étude	9
2. Méthodologie	
2.1 Acquisition des données radar et de terrain	10
2.2 Traitements des données radar	12
2.3 Traitements des données de terrain	15
2.4 Échantillonnage statistique des pixels	15
2.5 Évaluation des valeurs de constante diélectrique	16
2.6 Intégration des données et analyses quantitatives	16
2.7 Modélisation du coefficient de rétrodiffusion relatif de l'image radar	17
3. Résultats	
3.1 Détermination de la taille optimale de fenêtre d'échantillonnage	19
3.2 Corrélation des valeurs de constante diélectrique	19
3.3 Analyse du signal rétrodiffusé du modèle de petite perturbation	25
3.4 Analyse du signal rétrodiffusé relatif de l'image radar	38
3.5 Modélisation du signal rétrodiffusé en fonction des textures de sols nus	49

4.	Interprétation des résultats et discussion	76
5.	Conclusion	82
6.	Références	84
	Annexes	86

Liste des annexes

Annexe 1.	Tableau des données de terrain et des sols	86
Annexe 2.	Tableau des données de laboratoire	89
Annexe 3.	Tableau des données TDR	92
Annexe 4.	Tableau des coordonnées UTM des points d'échantillonnage	95

Liste des figures

Figure 1	Diagramme méthodologique	11
Figure 2	Image radar du site d'étude	14
Figure 3	Corrélations par taille de fenêtre de pixels	20
Figure 4	Diagramme de dispersion entre les valeurs diélectriques	21
Figure 5	Constante diélectrique calculée vs MvH_2O	22
Figure 6a	Constante diélectrique des sols de texture loam (L)	23
Figure 6b	Constante diélectrique des sols de texture loam limoneux (LL)	24
Figure 7a	Portion linéaire des valeurs diélectriques pour la texture L	26
Figure 7b	Portion linéaire des valeurs diélectriques pour la texture LL	27
Figure 8a	Facteur de réflexion (ρ_{HH}) vs MvH_2O pour la texture L	28
Figure 8b	Facteur de réflexion (ρ_{HH}) vs MvH_2O pour la texture LL	29
Figure 9	Dispersion de σ°_{HH} vs MvH_2O (SPM)	30
Figure 10	Dispersion de σ°_{HH} vs angle d'incidence (SPM)	31
Figure 11a	Dispersion de σ°_{HH} vs MvH_2O pour la texture L	33

Figure 11b	Dispersion de σ°_{HH} vs MvH_2O pour la texture LL	34
Figure 12a	Dispersion de σ°_{HH} vs angle d'incidence (texture L)	35
Figure 12b	Dispersion de σ°_{HH} vs angle d'incidence (texture LL)	36
Figure 13	Classification des texture de sol	37
Figure 14	Dispersion générale de $NG^2(dB)$ vs MvH_2O	39
Figure 15a	Dispersion de $NG^2(dB)$ vs MvH_2O des sols couverts	40
Figure 15b	Dispersion de $NG^2(dB)$ vs MvH_2O des sols nus	41
Figure 16a	Dispersion de $NG^2(dB)$ vs MvH_2O des sols nus (L)	43
Figure 16b	Dispersion de $NG^2(dB)$ vs MvH_2O des sols nus (LL)	44
Figure 17a	Portion linéaire de la courbe ρ_{HH} vs MvH_2O des sols nus (L)	45
Figure 17b	Portion linéaire de la courbe ρ_{HH} vs MvH_2O des sols nus (LL)	46
Figure 18a	Dispersion de $NG^2(dB)/\rho_{HH}$ vs MvH_2O (L)	47
Figure 18b	Dispersion de $NG^2(dB)/\rho_{HH}$ vs MvH_2O (LL)	48
Figure 19	Courbes des modèles $NG^2(dB)K$ vs MvH_2O pour les sols nus	50
Figure 20a	Dispersion de $NG^2(dB)/\rho_{HH}$ vs MvH_2O (L) suivant la nouvelle classification	53

Figure 20b	Dispersion de $NG^2(dB)/\rho_{HH}$ vs MvH_2O (LL) suivant la nouvelle classification	54
Figure 21a	Courbes des modèles $NG^2(dB)K$ vs MvH_2O pour les sols nus suivant la nouvelle classification	55
Figure 22a	Dispersion de $NG^2(dB)$ vs MvH_2O (L) suivant la nouvelle classification	58
Figure 22b	Dispersion de $NG^2(dB)$ vs MvH_2O (LL) suivant la nouvelle classification	59
Figure 23a	Dispersion de $NG^2(dB)/\rho_{HH}$ vs MvH_2O (L) suivant la classification proposée par le modèle	60
Figure 23b	Dispersion de $NG^2(dB)/\rho_{HH}$ vs MvH_2O (LL) suivant la classification proposée par le modèle	61
Figure 24	Courbes des modèles $NG^2(dB)K$ vs MvH_2O pour les sols nus suivant la classification proposée par le modèle	62
Figure 25a	Dispersion de $NG^2(dB)K$ vs $NG^2(dB)$ pour la texture loam suivant la classification proposée par le modèle	65
Figure 25b	Dispersion de $NG^2(dB)K$ vs $NG^2(dB)$ pour la texture loam limoneux suivant la classification proposée par le modèle	66
Figure 26a	Dispersion de $NG^2(dB)K$ vs MvH_2O pour la texture loam suivant la classification proposée par le modèle	67

Figure 26b	Dispersion de $NG^2(dB)K$ vs MvH_2O pour la texture loam limoneux suivant la classification proposée par le modèle	68
Figure 27a	Dispersion SPM des valeurs σ^{oHH} vs MvH_2O des sites reclassifiés de texture loam (L)	70
Figure 27b	Dispersion SPM des valeurs σ^{oHH} vs MvH_2O des sites reclassifiés de texture loam limoneux (LL)	71
Figure 28a	Dispersion SPM des valeurs σ^{oHH} en fonction de l'angle d'incidence sur les sites reclassifiés de texture L	72
Figure 28b	Dispersion SPM des valeurs σ^{oHH} en fonction de l'angle d'incidence sur les sites reclassifiés de texture LL	73
Figure 29a	Dispersion de σ^{oHH} vs MvH_2O pour un angle d'incidence de 52° à 53° sur les sites reclassifiés de texture L	74
Figure 29b	Dispersion σ^{oHH} vs MvH_2O pour un angle d'incidence de 52° à 53° sur les sites reclassifiés de texture LL	75

Liste des tableaux

Tableau 1	Classification des sites de sols nus par classe de texture	52
Tableau 2	Classification des sites par classe de texture de sol selon le modèle $NG^2(dB)K$	57
Tableau 3	Nouvelle classification proposée des sites par le modèle $NG^2(dB)k$ suivant les classes de texture de sols nus	64

Remerciements

Je désire d'abord remercier Q. Hugh Gwyn d'avoir dirigé ce mémoire. J'ai particulièrement apprécié sa vision optimiste de ce travail et son ouverture d'esprit devant mes choix.

Cette étude a été réalisée dans le cadre du programme de développement de données radar (PDDR) sous la responsabilité du Centre canadien de télédétection (CCT), ainsi que le Département d'agriculture du Nouveau Brunswick, à Frédéricton.

Je voudrais remercier T. Pultz, du CCT, qui a prêté le rugosimètre de terrain, et qui a fourni les données radar brutes de la mission NBCSAR-94. Je remercie S. Fhamy, d'Agriculture Canada à Frédéricton, qui a fourni les analyses de sols et qui m'a fait participer à cette campagne de terrain, ainsi que Mme J. Boisvert, d'Agriculture Canada, pour son soutien scientifique et technique avec la mesure TDR et pour ses conseils scientifiques et techniques. Je remercie également Y. Crevier, de RDI, alors qu'il était consultant au CCT pour le compte d'Intera Technologie, pour son assistance technique lors des prétraitements des images radar, pour son soutien moral et sa grande disponibilité.

De nombreuses personnes m'ont aidé par leur connaissance ou leur aide technique. Le support informatique est devenu plus accessible grâce à l'aide de P.A Chassé et des autres étudiants-chercheurs au Cartel dont A. Tarussov et Y. Moisan.

Je remercie enfin les membres de ma famille pour leur soutien moral, tout au long de ce projet, ainsi qu'à ma fiancée Socorro pour son appui sans démenti.

1 Introduction

1.1 Identification des besoins

La gestion des ressources agricoles nécessite des suivis répétitifs afin d'acquérir les données de terrain fondamentales à l'étude des comportements hydriques des terres cultivées. Les sols agricoles doivent supporter une irrigation suffisante pour permettre à la biomasse de se développer de façon efficace pour une production et une exploitation rentables des cultures. La qualité d'une parcelle de terrain cultivée dépend également de la qualité de son sol, lequel doit permettre une rétention hydrique et un apport nutritif suffisant pour favoriser la croissance des récoltes.

Les cartes pédologiques sont produites afin de connaître la distribution spatiale des sols adéquats pour l'agriculture. La classification des sols a pour but d'organiser de façon raisonnable et utile les informations des sols pour qu'elles puissent être répertoriées pour fin de communication efficace sur leurs caractéristiques et leurs potentiels agricoles. La texture d'un sol se réfère aux proportions relatives des constituants de sable, de silt et d'argile dans la couche superficielle du sol entre 0 et 25 cm, et pour le matériel parental plus ou moins altéré sur lequel le sol s'est développé (Fahmy *et al.*, 1986).

Les classes de drainage des sols sont employées pour définir la teneur en eau dépassant la capacité de rétention d'un champ, plus particulièrement la période temporelle pendant laquelle cet excès d'eau est retenu dans les racines des végétaux. La bonne connaissance du comportement hydrique des champs cultivés est primordiale afin d'établir les bilans hydriques afin de prévoir la qualité résultante des récoltes. Le potentiel de rétention en eau d'un sol dépend largement de sa composition texturale qui commande en quelque sorte la mobilité hydrique du sol. Un sol nu doit permettre une rétention des eaux de surface sur une période de temps suffisante pour supporter la croissance originelle des semences de culture. La gestion

des ressources agronomiques est une nécessité économique vitale pour les régions à forte densité de production agricole. Les exigences au niveau de la rentabilité des terres agricoles nécessitent de plus en plus des méthodes cartographiques efficaces pour les suivis répétitifs. Les méthodes de la télédétection pour la cartographie thématique sont de plus en plus recherchées pour leur facilité à acquérir les informations spatiales et physiques des terres. En effet, dans les études thématiques en agriculture, l'intégration des données spatiales avec les données multisources connexes est particulièrement efficace pour le suivi répétitif des conditions hydriques des sols.

1.2 Potentiel de la télédétection radar

Le potentiel de la télédétection radar repose sur sa capacité à détecter les expressions de surface des terrains dans des conditions atmosphériques défavorables aux méthodes de télédétection dans le domaine du visible et de l'infrarouge thermique. L'imagerie infrarouge thermique est depuis longtemps utilisée pour la cartographie de l'humidité des sols par l'emploi de systèmes passifs. Les systèmes imageurs infrarouge thermique détectent et enregistrent les variations de température causées par les échanges thermodynamiques des zones sèches et humides à la surface des sols.

Cependant, la dépendance aux conditions atmosphériques favorables empêche l'utilisation répétitive de l'infrarouge thermique, limitant ainsi son efficacité dans les suivis réguliers pour l'obtention des bilans hydriques des sols. Les phénomènes d'échanges thermodynamiques des sols sont dépendants de facteurs physiques dont la conductivité thermique qui s'accroît avec l'humidité en fonction de la porosité. Les sols humides refroidissent moins vite que les sols secs, ce qui nécessite la caractérisation des signatures spectrales en fonction des paramètres d'échanges thermiques des terrains, qui demeurent difficiles à contrôler en raison de leur dépendance aux conditions météorologiques locales.

La télédétection radar permet d'éliminer ces difficultés en mettant à profit sa capacité radiométrique aux fréquences plus basses du domaine des micro-ondes (3 cm à 100 cm). Les radars imageurs emploient des systèmes actifs, par l'émission de pulsations monochromatiques et cohérentes sur la surface des terrains. Le signal de retour contient, par son expression, les informations électromagnétiques propres de la surface diffusante au sol. Le coefficient de rétrodiffusion radar est une mesure relative du signal moyen de retour sensible aux caractéristiques physiques de la surface des terrains, mais indépendant des variations climatiques locales. Les fréquences utilisées des systèmes radar imageurs ne sont pas autant affectées par les conditions météorologiques des couverts nuageux et permettent une meilleure pénétration dans le sol, détectant ainsi les conditions physiques des sols. Le signal rétrodiffusé est sensible à la teneur en eau, ce qui rend l'utilisation du radar imageur profitable pour la télédétection des conditions d'humidité des sols.

1.3 La nature de la mesure

La propriété diélectrique d'une surface au sol est caractérisée par sa constante diélectrique, laquelle est une mesure relative de la réponse électromagnétique du milieu diffuseur. Cette réponse est représentée par deux facteurs dont le premier exprime les caractéristiques de propagation de l'onde radar dans la matière (vélocité et longueur d'onde), et le deuxième exprime la perte d'énergie dans le milieu. Ces deux facteurs sont exprimés par la partie réelle ϵ' et la partie imaginaire ϵ'' de la valeur relative de la constante diélectrique : $\epsilon_r = \epsilon' + j\epsilon''$. L'indice de réfraction n d'une substance diélectrique soumise à un rayonnement hyperfréquence s'exprime par la relation $n = \sqrt{\epsilon_r}$ et contrôle l'énergie rétrodiffusée d'une onde radar depuis la surface du sol. Le facteur de réflexion de puissance des valeurs diélectriques s'exprime par la relation de Fresnel : $\rho = (\cos \theta - \sqrt{\epsilon_r} \cos \theta) / (\cos \theta + \sqrt{\epsilon_r} \cos \theta)]^2$, où $\sqrt{\epsilon_r}$ est l'indice de réfraction au sol et θ est l'angle d'incidence du signal de retour.

On considère un sol comme un matériel diélectrique dont les propriétés peuvent varier selon le taux d'humidité. L'eau est une molécule polaire qui possède à l'état normal un moment dipolaire électrique non nul dont le centre de masse des charges négatives ne coïncide pas avec le centre de masse des charges positives (Arès et Marcoux, 1974). Lors d'un épisode d'acquisition, le radar imageur transmet une courte impulsion d'énergie hyperfréquence, monochromatique et cohérente, qui illumine une bande étroite de terrain perpendiculairement à la direction de vol.

Sous l'effet de la pulsation de l'onde radar, les molécules d'eau dans le sol acquièrent une polarisation diélectrique suivant le temps de relaxation requis aux molécules pour s'aligner avec le champ électrique de l'onde hyperfréquence incidente. Comme l'onde est sinusoïdale, les molécules d'eau possèdent alors un mouvement de rotation entretenu à la fréquence de l'onde radar appliquée. Accélérées par effet de couple, les molécules d'eau atteignent une vitesse angulaire ω en fonction de leur fréquence d'excitation f , qui s'exprime par la relation $\omega = 2\pi f$. Ainsi, chaque molécule d'eau va ré-émettre une onde secondaire de même fréquence et de même forme, mais avec une intensité de retour qui dépend de l'atténuation propre aux délais de relaxation diélectrique des molécules d'eau. Le phénomène de relaxation diélectrique est causé par la redistribution de l'énergie de rotation d'un système moléculaire et dépend du facteur d'amortissement d'un système oscillant soumis à une pulsation.

Cette onde secondaire constitue une ré-émission électromagnétique de même forme et fréquence que l'onde initiale, causant le phénomène de rétrodiffusion à partir du sol. L'intensité du signal de retour radar dépend de la proportion d'énergie incidente responsable de l'excitation des molécules d'eau dans le sol. La proportion du signal rétrodiffusé est également influencée par la géométrie de visée de l'onde radar incidente et de la rugosité de surface du sol. Ces effets géométriques de surface sont variables suivant les caractéristiques topographiques et les microvariations centimétriques de la surface du sol. Une surface diélectrique au sol sera donc plus ou moins rugueuse ou lisse, et affectera l'intensité du signal rétrodiffusé avec une

réflexion plus ou moins diffuse ou spéculaire. Le signal rétrodiffusé radar est proportionnel aux valeurs RMS des hauteurs et de longueur de corrélation d'un profil de surface au sol dans la direction de l'onde incidente (Ulaby et al., 1982).

L'émission ou l'absorption de micro-ondes dans un sol nu est nécessairement liée au moment dipolaire électrique de la molécule d'eau, qui est l'élément de couplage entre l'onde radar incidente et le système mécanique de la molécule d'eau. La quantité de molécules d'eau polarisées dans le champ électrique au passage de l'onde radar incidente définit la densité superficielle de charges induites par unité de volume, laquelle est numériquement égale à la polarisation diélectrique du milieu. Le degré de polarisation diélectrique dépend de la nature du milieu et de l'intensité du champ électrique de l'onde radar. La nature d'un milieu diélectrique est définie par sa susceptibilité diélectrique η . Plus celle-ci est grande, plus le milieu diélectrique sera polarisé. La susceptibilité diélectrique est liée à la constante diélectrique par la relation : $\epsilon_r = 1 + \eta/\epsilon_0$, où ϵ_0 est la permittivité du vide (Arès et Marcoux, 1970). La valeur de la constante diélectrique d'un sol augmente ainsi avec la susceptibilité et la polarisation diélectrique du milieu, lesquelles sont liées à la densité de charges induites par unité volumique et ainsi, à la teneur en eau volumique du sol.

L'eau de rétention dans un sol est constituée d'eau dite adsorbée, fixée au grain solide par l'attraction moléculaire, et d'eau pelliculaire, laquelle entoure d'une mince pellicule micrométrique les particules du sol avec l'eau adsorbée. L'eau pelliculaire se déplace à l'état liquide par l'attraction moléculaire entre les particules voisines (adhésion). La quantité d'eau pelliculaire, liée à la surface spécifique des particules, est plus importante dans les sédiments fins que dans les sédiments plus grossiers. À titre d'exemple, la surface spécifique des sables très fins est de l'ordre de 50 cm² par cm³, et de 500 à 800 cm² par cm³ pour les argiles (Landry et Mercier, 1993).

Ainsi, la mobilité hydrique des molécules d'eau dans un sol est contrainte par l'effet spatial volumique de la taille des particules. La quantité de molécules d'eau, suffisamment libres pour se polariser dans un sol nu sous l'effet de l'onde radar, est liée à la densité de charges induites par unité de volume, et donc à la teneur en eau volumique par unité de surface spécifique de la composition texturale du sol.

1.4 Problématique

Les classes texturales des sols sont définies en termes de distribution de particules primaires estimée par analyse granulométrique. Ces classes texturales sont associées à des horizons spécifiques et se réfèrent à la fraction fine de la granulométrie des sols, soit aux tailles inférieures à 2 mm. Les principales classes de texture de sols agricoles sont établies suivant le pourcentage de sable et d'argile; le pourcentage résiduel de chaque classe étant du limon (Canada Soil Survey Committee, 1978).

Dans un contexte hydrologique, les sols constituent un milieu ayant en commun la mobilité hydrique. Une eau de rétention se définit comme l'eau retenue dans les vides d'un milieu poreux, saturé ou non. En hydrologie appliquée, on utilise la notion de capacité de rétention spécifique d'un champ pour décrire la teneur en eau de rétention permettant de supporter la croissance des récoltes. Elle joue également un rôle important dans le comportement diélectrique d'un sol. Il existe une forte corrélation entre l'humidité du sol des cinq premiers centimètres et la rétrodiffusion radar en bande C (Ulaby *et al.*, 1982). Les travaux de Schmugge (1980) ont démontré que la valeur de la constante diélectrique d'une argile était plus faible que celle d'un sable pour un même taux d'humidité, mais que la valeur transitoire de la réponse diélectrique d'une argile était atteinte à une valeur d'humidité volumique plus haute que celle d'un sable. Initialement, lorsque l'eau est ajoutée au sol sec, elle est fortement liée aux particules adsorbantes. Dans cet état, les molécules d'eau ne sont pas libres de s'aligner et la propriété diélectrique résultante est similaire à celle de la

glace ($\epsilon_i = 3,2$). Une plus grande quantité d'eau, ajoutée graduellement, s'accumulera en eau pelliculaire plus libre, augmentant la densité superficielle de charge induite par unité de surface spécifique et ainsi, la valeur de la constante diélectrique résultante. Lorsque la teneur en eau volumique atteint une certaine valeur de transition, la valeur de la constante diélectrique augmente fortement en fonction du taux croissant d'humidité, vers les valeurs de saturation. Pour un sable, ce point de transition est atteint avec une teneur en eau volumique moindre que celle d'une argile. La surface spécifique d'une argile étant plus importante que celle d'un sable, les eaux pelliculaires doivent donc occuper une surface spécifique plus importante avant que la mobilité hydrique de l'eau libre ne soit atteinte.

Les équations d'Hallikainen (Hallikainen *et al.*, 1985) expriment la valeur de la constante diélectrique à partir d'une combinaison texturale sable-argile contenant des teneurs en eau volumique variables. Ces équations polynomiales furent établies en laboratoire par des mesures d'atténuation hyperfréquence sur des échantillons de sol composés de proportions variables de sable et d'argile et soumis à des fréquences comprises entre 1,4 GHz et 18 GHz. D'autres mesures diélectriques expérimentales effectuées sur les mêmes échantillons de sol ont montré des corrélations similaires avec les valeurs diélectriques calculées à l'aide de différents modèles physique et semi-empirique. Ces résultats ont montré que la même précision peut être obtenue avec trois modèles différents, mais que celui d'Hallikainen demeurerait le plus simple à calculer (Dobson *et al.*, 1978). Le modèle d'Hallikainen est un modèle empirique expérimental qui n'utilise que les pourcentages de sable et d'argile permettant de calculer la constante diélectrique d'un sol à partir de la teneur en eau volumique. D'autres travaux plus récents (Tian and Gwyn, 1994) ont montré une nette dépendance du signal rétrodiffusé radar avec les textures de sols en utilisant le modèle de petite perturbation (Dobson *et al.*, 1978). Ce modèle physique théorique permet de calculer la valeur au pixel du signal rétrodiffusé à partir des paramètres radar connus (longueur d'onde et polarisation) et les paramètres physiques des sols (constante diélectrique, angle d'incidence et rugosité de surface). Les résultats de ces

travaux ont montré que la différence maximum entre un sol sableux et un sol argileux était obtenue avec une teneur en eau volumique de 10% à 15% aux fréquences comprises entre 1,4 GHz et 18 GHz et pour des angles d'incidences entre 20° et 45°. La différence entre les valeurs du coefficient de rétrodiffusion, pour différentes textures de sols, étant plus grande à des fréquences plus basses, la séparation des textures serait meilleure en bande L (1,4 GHz) que pour les autres bandes (C et X).

La détermination de la combinaison optimale des paramètres physiques exprimant le signal rétrodiffusé en fonction des textures de sols semble être bien réalisée par l'emploi d'un modèle physique théorique. Cependant, la relation entre les textures de sols et le signal rétrodiffusé radar doit être démontrée sur le terrain, où l'élément crucial de cette relation repose sur la valeur de la constante diélectrique calculée à partir de la composition texturale sable-argile en fonction de la teneur en eau volumique des sols.

1.5 Objectifs

L'objectif principal est d'utiliser les données radar et de terrain afin de démontrer expérimentalement, par télédétection radar, la relation des classes de texture de sol avec le coefficient de rétrodiffusion. De cet objectif principal, découlent deux objectifs secondaires :

- a) utiliser les données de radar et de terrain pour vérifier le modèle d'Hallikainen
- b) vérifier le modèle de petite perturbation pour une application thématique des classes de texture de sols sur des parcelles agricoles.

1.6 Hypothèse

La texture d'un sol et le coefficient rétrodiffusé radar sont reliés, et ce lien est plus apparent dans des conditions d'humidité moyenne du sol.

1.7 Site d'étude

Le site d'étude se situe dans la région de Woodstock du canton de Carleton au Nouveau-Brunswick, et couvre une superficie de 7 km par 11 km. La physiographie est dominée par une ceinture montagneuse complexe, accentuée de hauts et de bas reliefs séparés par des couloirs plats et étendus d'orientation nord-est, typiquement appalachienne. La topographie est variée avec des dépôts glaciaires principalement composés de till de base avec des portions mineures de till d'ablation et de matériaux résiduels. Les expressions de surface des terrains sont contrôlées par des affleurements rocheux fréquemment entourés de till sableux et pierreux, lesquels influencent beaucoup la pierrosité des sols. Du point de vue pédologique, deux principaux types de texture de sols sont prépondérants dans la région, soit la texture Carleton de composition loam, et la texture Caribou de composition loam limoneux avec quelques portions mineures de loam argileux (Fahmy *et al.*, 1986). Les textures sont classifiées selon le système canadien de classification des sols (Canada Soil Survey Committee, 1978).

Les parcelles de terrain couvrent 7 champs avec des sols nus, des sols couverts et des sols partiellement couverts à 20%. Les expressions de surface, sur les sols nus et les sols partiellement couverts, sont influencées par la pierrosité des champs et les sillons mécaniques de bas relief dans les champs. Les parcelles totalement couvertes de végétation sont en grande majorité utilisées comme pâturages.

2. Méthodologie

La figure 1 montre l'organigramme méthodologique des étapes d'acquisition, de traitement et d'analyse des données. Dans cette étude, il s'agit essentiellement de comparer la valeur du signal rétrodiffusé en bande C, suivant le taux d'humidité pour deux classes de texture en condition de sol nu, à des angles d'incidences entre 45° et 70°, et selon les paramètres physiques des sols sur chaque site d'échantillonnage.

Le signal rétrodiffusé est représenté par la valeur calculée σ°_{HH} du modèle de petite perturbation (SPM) et aussi par la valeur logarithmique du niveau de gris au carré ($NG^2(dB)$) de l'image radar, laquelle exprime une valeur relative pondérée du coefficient de rétrodiffusion avec une variabilité interne de l'ordre de 0,5 dB.

2.1 Acquisition des données radar et de terrain

Les données radar furent acquises dans la matinée du 3 juin 1994 par le Convair 580 du Centre canadien de télédétection (Canada Centre for Remote Sensing, 1994), à une altitude de 8 673 m au-dessus de la région de Woodstock, Nouveau Brunswick., par un couvert nuageux suivi d'éclaircie en après-midi. Des pluies intermittentes avaient eu lieu la veille rendant ainsi les sols humides. Pendant les périodes d'éclaircie, des vents modérés ont amené un assèchement progressif des sols. Les données radar furent acquise en bande C, en polarisation HH suivant deux azimuts de vols (E-W et W-E) et dont le regard oblique vers le sud avait un angle de dépression de 45° à 20°.

Les données de terrain, acquises simultanément avec les données radar, se répartissent sur 7 champs agricoles et comprennent 89 échantillons de sols, 44 mesures TDR, et 5 mesures de rugosité de surface (hauteur RMS et longueur de corrélation).

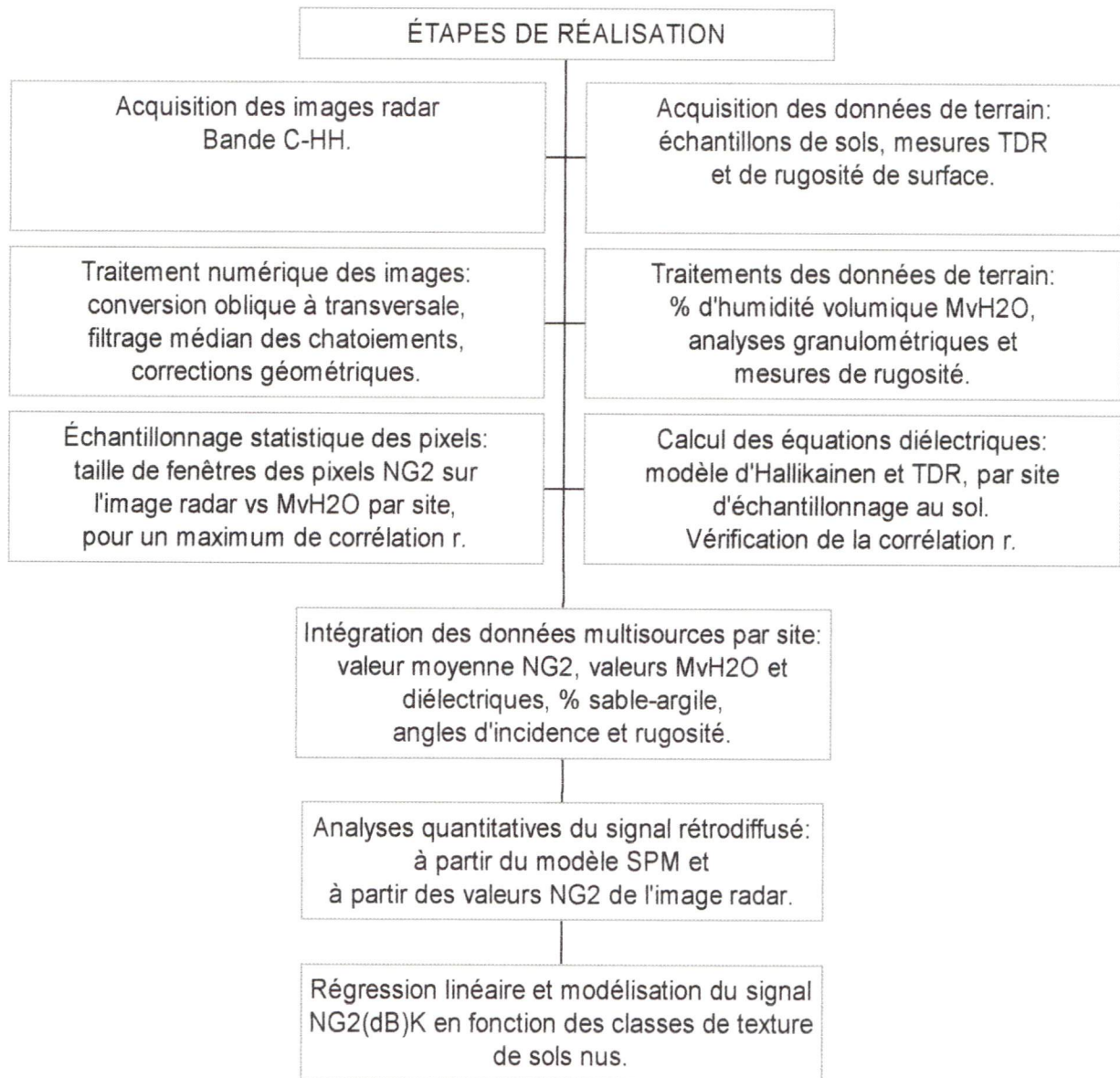


Figure 1. Diagramme méthodologique

Les mesures TDR possèdent l'avantage de fournir directement le taux d'humidité volumique du sol et aident donc à quantifier la variabilité spatiale de l'humidité du sol in situ (Topp, 1987).

Les mesures de rugosité de surface furent effectuées à l'aide d'un rugosimètre de terrain portatif, conçu pour mesurer la rugosité sur de petites surfaces de terrain de l'ordre de 10 mm par 500 mm, en utilisant une technique photographique en visée oblique (Johnson *et al.*, 1993). Afin de compléter la documentation visuelle de la vérité terrain, plusieurs photos furent prises sur les principaux sites d'échantillonnage afin de caractériser les expressions de surface des sols nus, couverts et partiellement couverts.

Chaque site d'échantillonnage, préalablement marqué au sol, fut prélevé en cinq points dont le premier central correspondait à la coordonnée UTM exacte du site, et les quatre autres, aux points cardinaux distants de 5 m par rapport au centre. L'échantillonnage comprenait une quantité volumique de sol sur deux profondeurs respectives de 0 à 5 cm et de 5 à 10 cm, suivi d'un échantillonnage en vrac autour de chaque trou. Un total de 15 échantillons fut prélevé sur chaque site, représentant une surface d'échantillonnage de 78,5 m². Les sites d'échantillonnage étaient distants de 100 m et alignés suivant la longueur des champs.

2.2 Traitement des données radar

Les étapes de traitement effectuées sur l'image radar brute se résument à une conversion oblique à transversale, au filtrage médian des chatoiements et à une correction géométrique à partir de cartes orthophotos donnant les coordonnées exactes des points d'échantillonnage sur les parcelles de terrain. La conversion oblique à transversale est une procédure de correction d'images radar visant à convertir la résolution en distance oblique du signal rétrodiffusé en distance transversale selon la résolution au sol. Elle s'effectue en divisant la distance oblique

par le cosinus de l'angle de dépression pour chaque pixel. On étalonne ainsi la distance transversale sur l'image radar correspondant à l'angle d'incidence, depuis le bord rapproché jusqu'au bord éloigné du corridor d'accès du faisceau radar. L'image résultante demeure dépourvue de toute correspondance spatiale et doit être géocorrigée. À partir de points de contrôle relevés à l'aide de l'outil PAMAP sur deux séries de cartes orthophotos à l'échelle 1:10 000, les coordonnées UTM des points de contrôle furent intégrées dans la base de données spatiales du système de traitement d'image PCI.

Les points de contrôle furent choisis parmi les nombreux repères topographiques et anthropiques régionaux (cours d'eau, intersections des routes, limites des champs). L'image radar fut corrigée avec une transformation polynomiale d'ordre 2, à partir de 16 points de contrôle. L'utilisation d'une transformation polynomiale d'ordre inférieur minimise les possibilités d'erreurs de distorsion dans les zones dépourvues de points de contrôle. Également, en échantillonnant un nombre plus important de points de contrôle, on réduit les erreurs de positionnement par moyenne statistique.

Lors du traitement de correction géométrique, les pixels originaux sont ré-échantillonnés pour correspondre aux coordonnées géométriques exactes. Les valeurs de niveau de gris (NG) des pixels furent intégrées dans la matrice corrigée par la méthode d'interpolation du pixel avoisinant, pour son économie de temps de calcul et pour sa particularité de ne pas altérer la valeur NG du pixel corrigé. La précision obtenue dans le positionnement des sites d'échantillonnage reportés sur l'image radar est de l'ordre de 1 pixel, pour une résolution au sol de 4 m par 4 m (fig. 2). Les résultats de la correction géométrique s'avèrent très bons en suivant la méthode des points de contrôle et que la méthode dite "photogramétrique" qui utilise un modèle numérique de terrain n'était pas nécessaire parce que la variation du relief local est inférieure à 100 m.

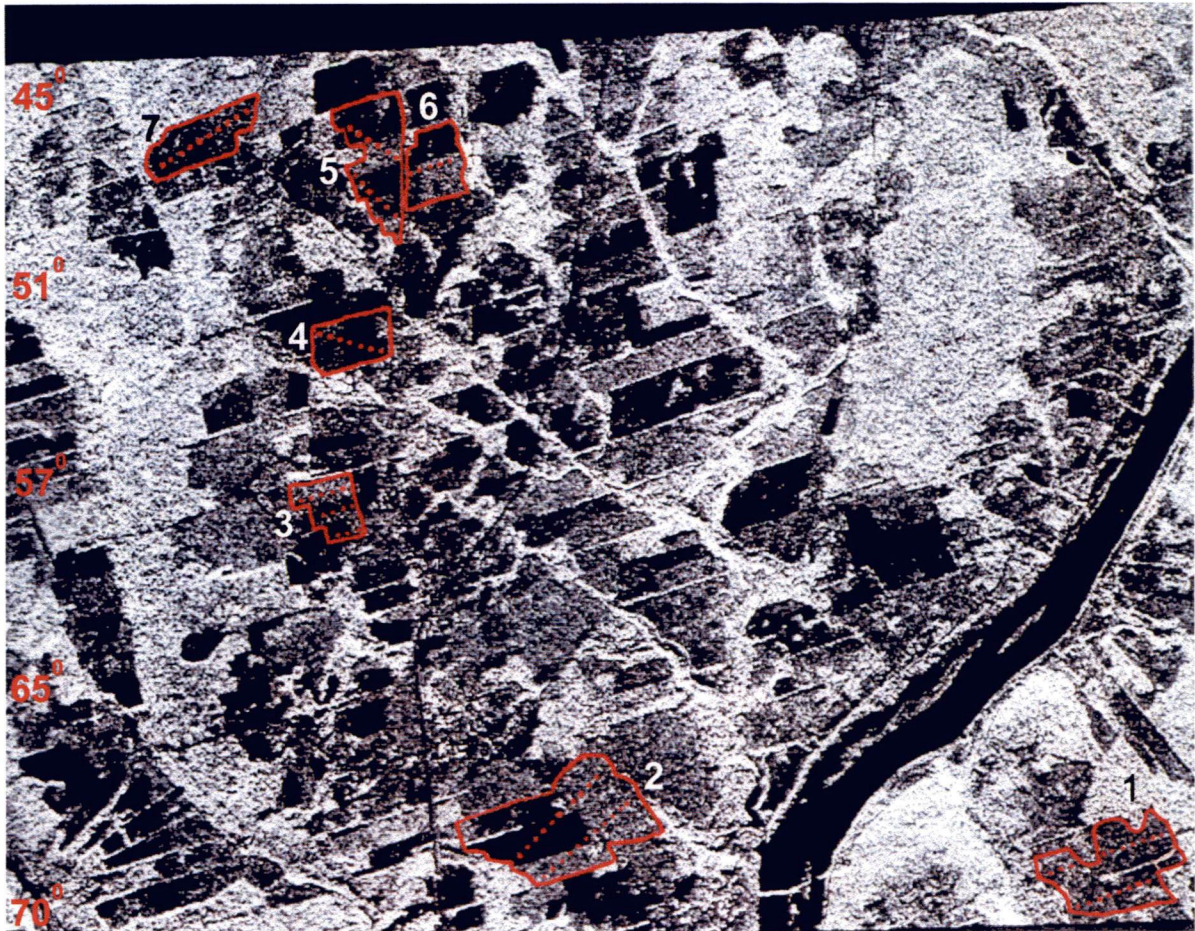


Figure 2. Image radar en bande C-HH, montrant la localisation des champs (F1 à F7) aux angles d'incidence de 45° à 70° .

2.3 Traitement des données de terrain

Les analyses de sols furent effectuées en laboratoire pour 89 échantillons de sols donnant les pourcentages respectifs de sable, de silt et d'argile avec la teneur en eau volumique (MvH_2O). Les mesures de rugosité furent traitées sur support informatique à partir des négatifs numérisés contenant les informations des profils de rugosité de surface. Les données furent analysées par un logiciel traitant les positions spatiales de rugosité produisant les profils x, y, z des surfaces mesurées. La rugosité d'une surface naturelle est déterminée par l'écart type de la hauteur de surface (RMS) et par sa longueur de corrélation l (Johnson *et al.*, 1993).

2.4 Échantillonnage statistique des pixels

Les valeurs NG des pixels échantillonnés sur l'image radar correspondent aux points d'échantillonnage des sols, suivant différentes tailles de fenêtre allant de 3 x 3 à 17 x 17. Afin d'exprimer une valeur de puissance compatible avec celle du signal rétrodiffusé, la valeur NG est exprimée au carré. Cette nouvelle valeur NG^2 au pixel représente la puissance relative du signal rétrodiffusé sur l'image radar. On détermine la qualité de l'échantillonnage statistique des pixels sur l'image radar afin qu'ils soient corrélatifs avec l'humidité des sols des cinq premiers centimètres sur l'ensemble des parcelles de terrain. Pour cela, on établit la corrélation entre une population de pixels, par taille croissante de fenêtre, pour chaque site d'échantillonnage au sol et pour chaque champ (F1 à F7).

La corrélation est déterminée entre la valeur moyenne des NG^2 des pixels par taille de fenêtre et les valeurs d'humidité volumique (MvH_2O) de chaque site d'échantillonnage au sol. L'analyse des maximums de corrélation est évaluée par taille de fenêtre, pour chaque champ et permet de déterminer la taille de fenêtre optimale pour un maximum de corrélation entre le signal rétrodiffusé de l'image radar et la valeur MvH_2O des sites d'échantillonnages au sol. Les étapes successives d'analyses statistiques sont, par la

suite, effectuées à partir des valeurs NG^2 moyennes selon taille de fenêtre optimale sélectionnée.

2.5 Évaluation des valeurs de constante diélectrique

À partir des mesures TDR au sol converties en valeurs diélectriques (ϵ_r TDR) (Topp, 1987) et les valeurs diélectriques calculées par le modèle d'Hallikainen (ϵ_r Hall) (Hallikainen *et al.*, 1985), il s'agit de déterminer la force de relation existant entre les valeurs calculées par un modèle empirique et les valeurs mesurées in situ. L'élément crucial dans cette recherche sur la relation entre le signal rétrodiffusé radar et la texture des sols repose sur la valeur de la constante diélectrique calculée à partir de la composition texturale sable-argile et la valeur MvH_2O , à l'aide du modèle d'Hallikainen.

2.6 Intégration des données et analyses quantitatives

Les analyses quantitatives furent effectuées à partir des données radar et de terrain, puis triées pour chaque site d'échantillonnage au sol. Les données regroupent la correspondance entre : les valeurs MvH_2O des cinq premiers centimètres de sol; la composition texturale en pourcentage de sable, de silt et d'argile; l'angle d'incidence au sol; la valeur NG^2 suivant la taille optimale de fenêtre; les valeurs de constante diélectrique; les valeurs de rugosité de surface; les classes de texture de sol et les types de parcelles (sols nus, couverts et partiellement couverts). Les valeurs du facteur de réflexion de Fresnel (ρ_{HH}), du coefficient de rétrodiffusion relatif $NG^2(dB)$ de l'image radar, et celui du SPM, furent calculées à partir des données pour chaque site. Dans un premier temps, il s'agit d'analyser le comportement du signal rétrodiffusé théorique σ^0_{HH} pour les deux classes de texture, afin de dégager les conditions optimales parmi les paramètres physiques affectant le signal rétrodiffusé au sol, vis-à-vis les textures de sols. Suite à cette première analyse, il s'agit ensuite d'évaluer, pour chaque classe de texture de sols, la force de relation entre la valeur $NG^2(dB)$ de

l'image radar et le facteur de réflexion ρ_{HH} calculé à partir de la valeur de constante diélectrique du modèle d'Hallikainen et de l'angle d'incidence sur chaque site.

Dans une relation empirique expérimentale, l'équation générale du coefficient de rétrodiffusion radar est exprimée par une relation linéaire avec deux termes principaux, à savoir le facteur de réflexion ρ_{HH} auquel est associé un second terme qui représente une constante de proportionnalité. Cette expression prend la forme d'une équation linéaire de type $y = mx + b$, où la pente m exprime la tendance statistique d'un rapport de proportion entre le signal rétrodiffusé y et la variable indépendante x , laquelle représente les paramètres physiques des sols (MvH_2O , ρ_{HH}). La pente serait contrôlée par la texture du sol (Dobson and Ulaby, 1986). Afin de vérifier cette relation de proportionnalité entre les textures de sols et les valeurs relatives du signal rétrodiffusé sur l'image radar, le rapport $NG^2(dB)/\rho_{HH}$ est utilisé afin de faire ressortir les effets texturaux des sols à partir de la valeur $NG^2(dB)$ sur le dénominateur commun du coefficient de réflexion ρ_{HH} , calculé pour chaque site d'échantillonnage. Ce rapport est défini sous le terme général de "paramètre K" et favorise l'expression des textures de sol nus vis-à-vis la valeur $NG^2(dB)$ de l'image radar. L'analyse de régression linéaire entre le rapport $NG^2(dB)/\rho_{HH}$ et la valeur MvH_2O détermine les constantes de proportionnalité propres à chaque classe de texture de sol; K_L pour la classe de texture loam et K_{LL} pour la classe de texture loam limoneux.

2.7 Modélisation du coefficient de rétrodiffusion relatif de l'image radar

L'inversion du modèle empirique $NG^2(dB)K$ permet de reconstituer l'équation générale du signal rétrodiffusé relatif à partir d'une image radar en fonction de la réponse diélectrique propre à chaque classe de texture de sol, suivant les conditions hydriques optimales sur les sols nus. Cette équation générale est de la forme $NG^2(dB)K = [m(MvH_2O) + b] \rho_{HH}$, où m est la pente et b l'ordonnée à l'origine propre à chaque classe de texture. Afin de déterminer le taux de réussite dans l'identification des textures de sols nus à partir des modèles inversés pour chaque classe de texture, les

nouvelles valeurs $NG^2(\text{dB})$ K sont comparées avec les valeurs originelles $NG^2(\text{dB})$ de l'image radar.

3. Résultats

3.1 Détermination de la taille optimale de fenêtre d'échantillonnage

L'ensemble des courbes de corrélation $NG^2(\text{dB})$ vs MvH_2O pour les 7 champs (F1 à F7) montre que la tendance statistique des corrélations augmente avec la taille de fenêtre pour atteindre un plateau autour de la taille 11 x 11 (fig. 3). Au-delà de cette taille de fenêtre, la valeur moyenne de corrélation de l'ensemble des champs ne varie pas suffisamment pour justifier la sélection des tailles supérieures. La qualité de l'échantillonnage statistique des pixels de l'image radar est jugée suffisante avec la taille de fenêtre 11 x 11 pour les étapes d'analyses quantitatives du signal rétrodiffusé relatif $NG^2(\text{dB})$. L'échantillonnage des pixels sur l'image radar représente alors une surface au sol de 44 m x 44 m.

3.2 Corrélation des valeurs de constante diélectrique

La corrélation fut établie entre les valeurs diélectriques mesurées sur 44 sites par réflectométrie temporelle (ϵ_r TDR), et les valeurs diélectriques calculées par le modèle de Hallikainen (ϵ_r Hall). Le coefficient de détermination r^2 de 0,6 est jugé acceptable pour permettre l'utilisation des valeurs du modèle d'Hallikainen dans l'analyse du comportement diélectrique des sols (fig. 4).

L'analyse du comportement diélectrique en fonction des valeurs MvH_2O (fig. 5), pour l'ensemble des 89 sites d'échantillonnage, montre que la courbe a une tendance linéaire aux valeurs MvH_2O inférieures à 30%. Au-delà de 30%, la valeur de la constante diélectrique montre une croissance plus forte vers les valeurs de saturation. Le comportement diélectrique en fonction des valeurs MvH_2O est différent pour les deux classes de texture loam et loam limoneux, illustré sur les figures 6a et b, où cette différence est exprimée dans les équations de régression polynomiales.

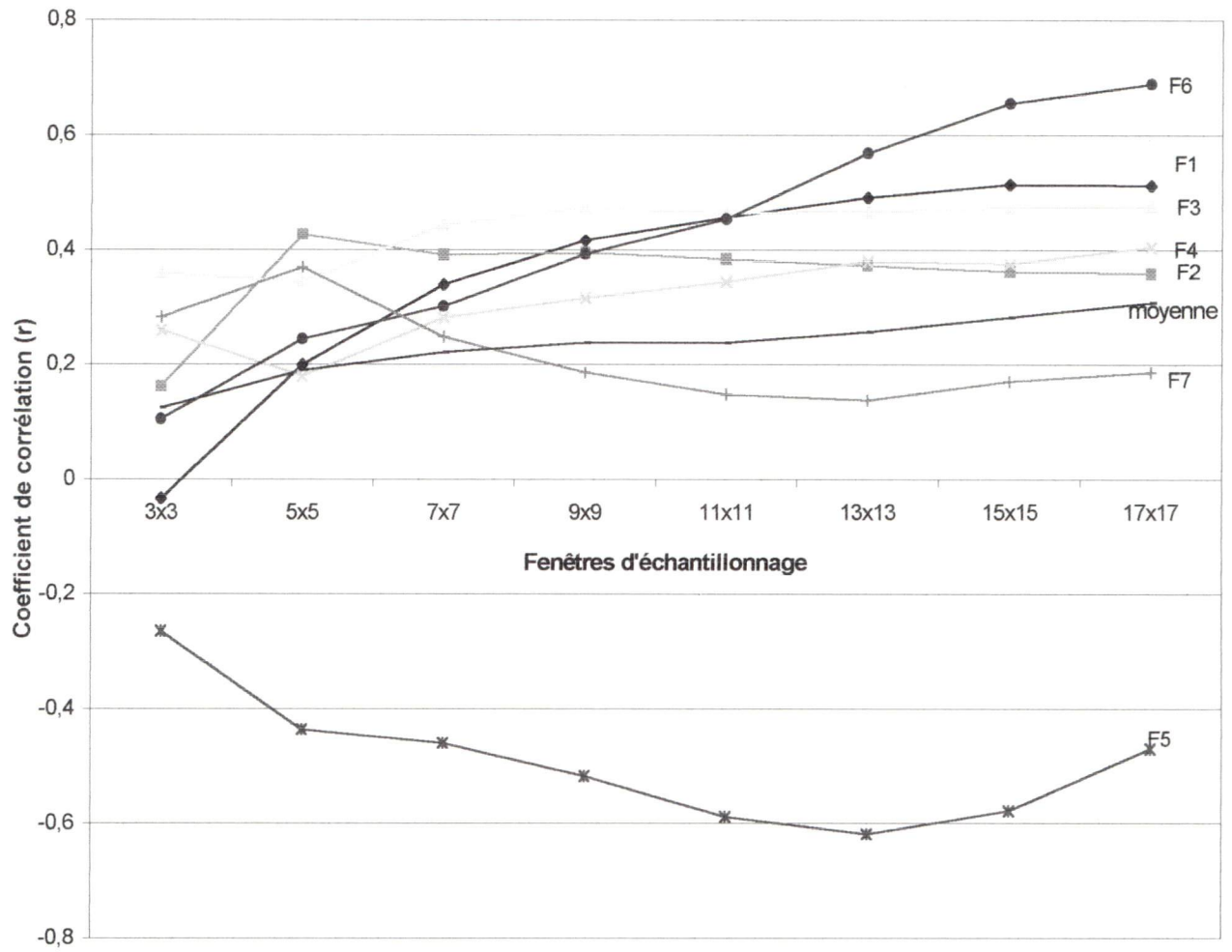


Figure 3. Corrélations NG^2 vs MvH_2O par taille de fenêtre de pixel et pour chaque champ.

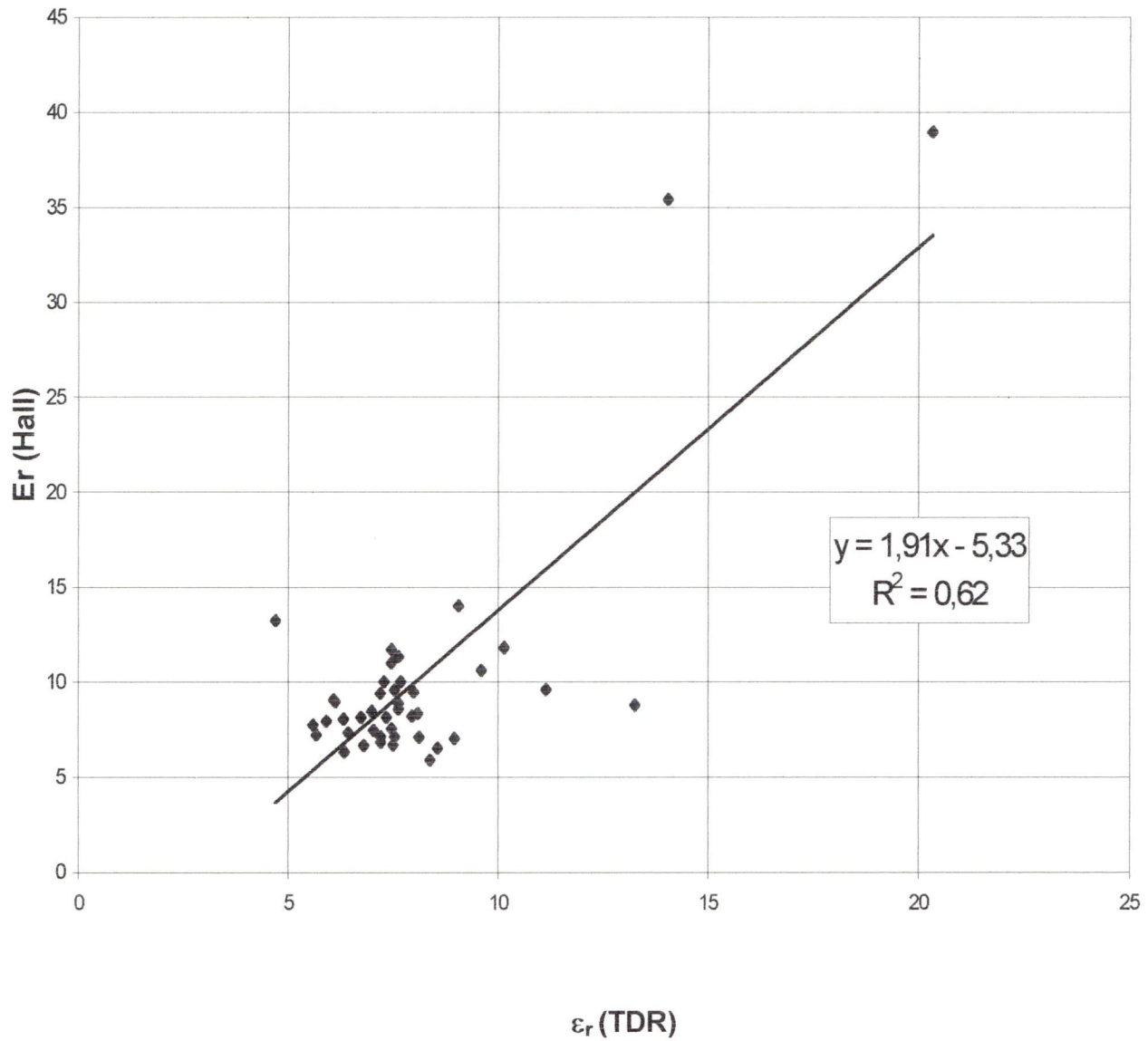


Figure 4. Dispersion entre les valeurs ϵ_r (Hall) calculées par le modèle d'Hallikainen et les valeurs ϵ_r (TDR) mesurées in situ.

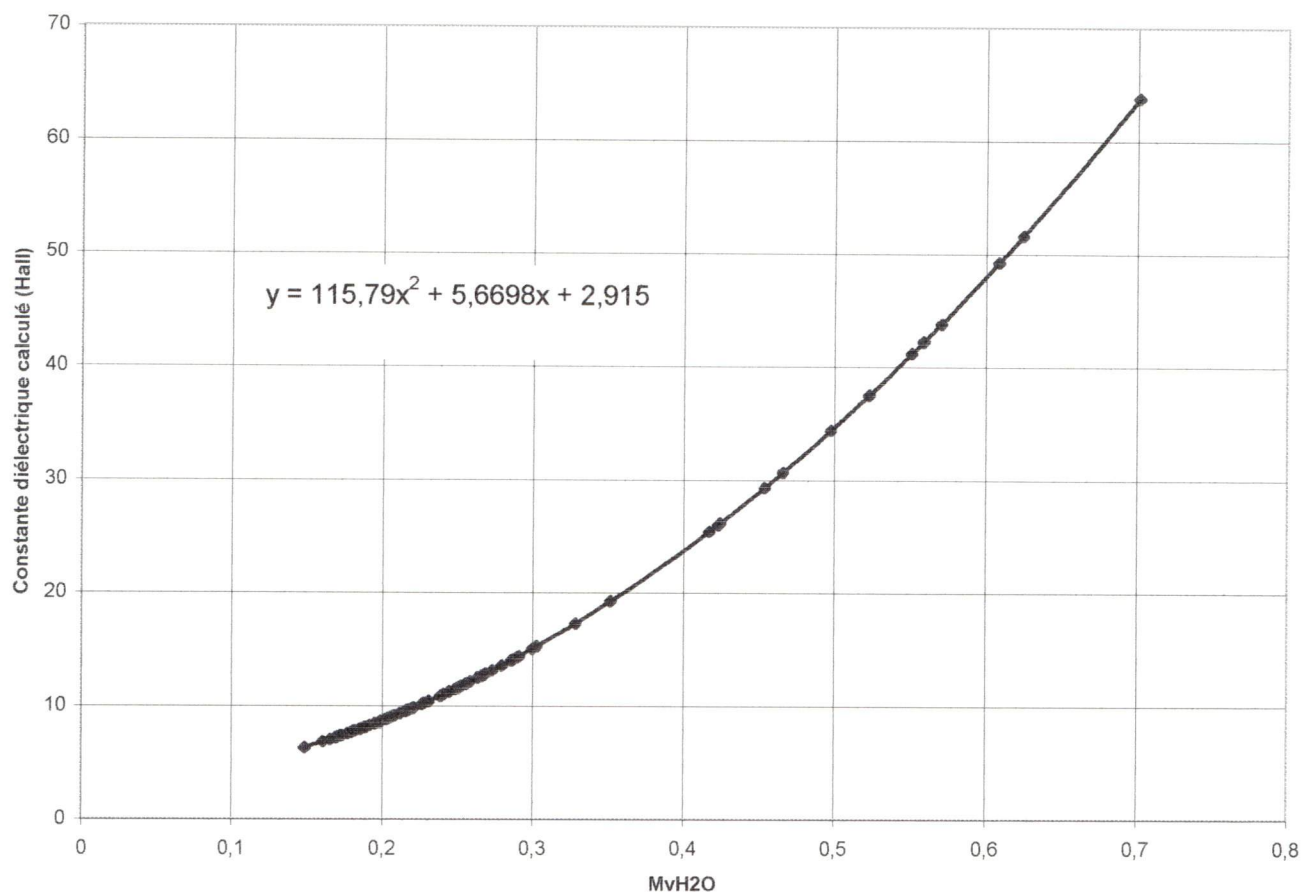


FIGURE 5. Graphique de la valeur $\epsilon_r(\text{Hall})$ en fonction de la teneur en eau volumique (MvH_2O).

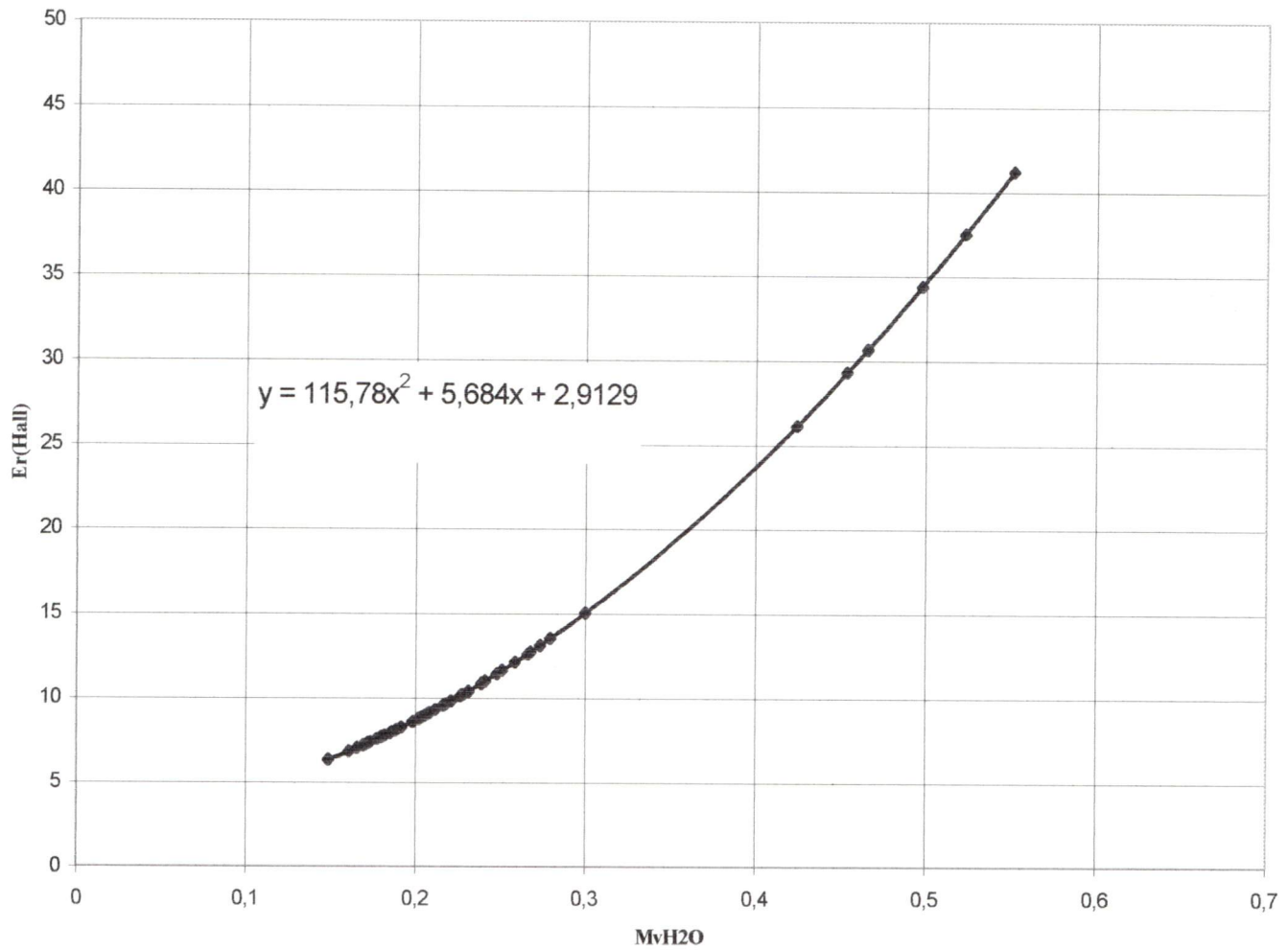


FIGURE 6a. Courbe de la constante diélectrique $\epsilon_r(\text{Hall})$ vs MvH_2O sur les sites de texture loam.

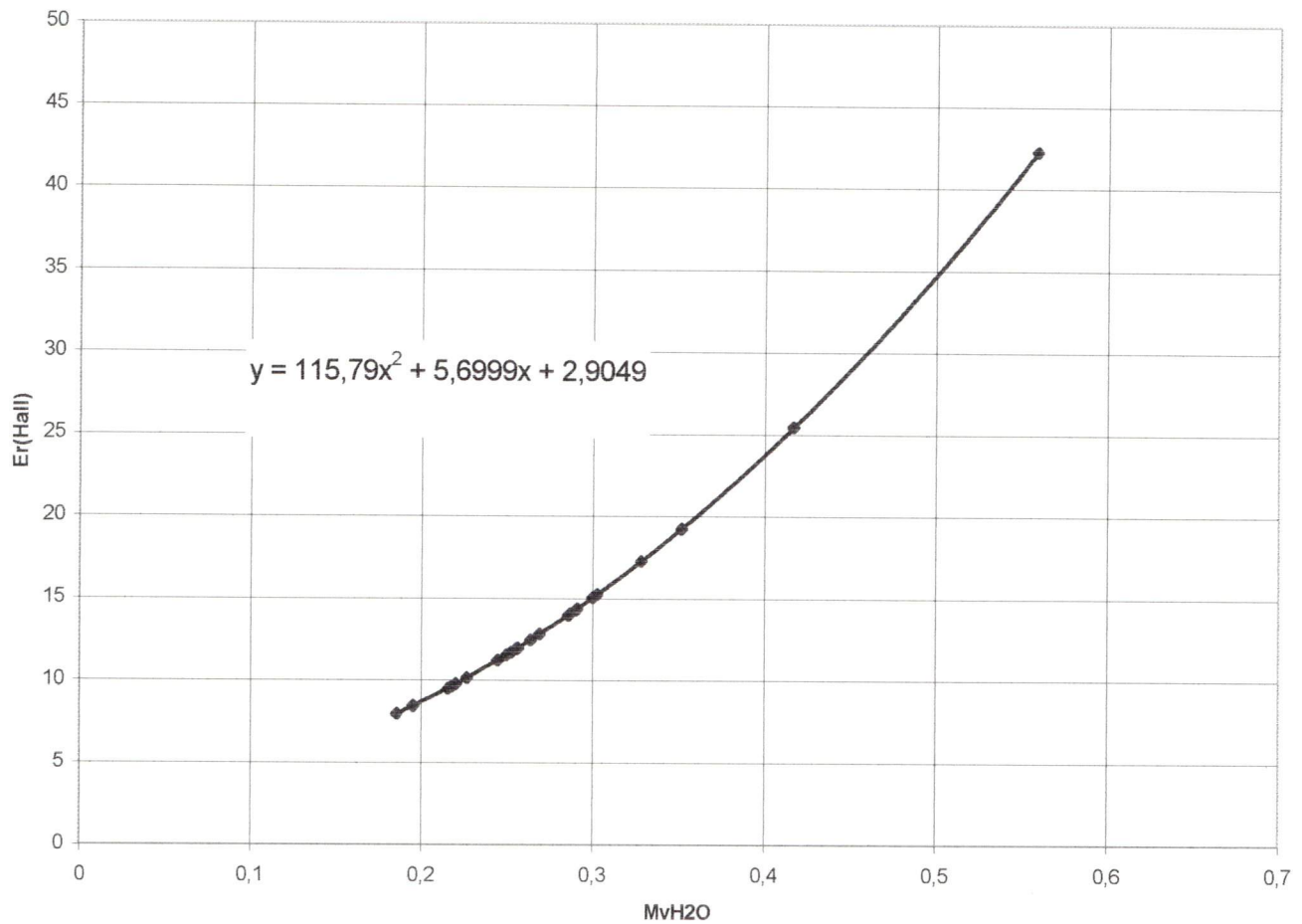


FIGURE 6b. Courbe de constante diélectrique $\epsilon_r(\text{Hall})$ vs MvH_2O sur les sites de texture loam limoneux.

L'analyse de la portion linéaire de chaque courbe diélectrique, aux valeurs MvH_2O inférieures à 30%, montre que le comportement diélectrique entre les classes de texture de sols est différent dans des conditions d'humidité sèche à moyennement humide. Cette différence est illustrée par les valeurs des pentes des droites de proportionnalité entre la classe de texture loam et celle de la classe loam limoneux (fig. 7a et b). Ce comportement diélectrique distinct entre deux classes limitrophes de texture de sols forme le lien entre la réponse radar et la texture d'un sol. Ce lien est représenté par la constante diélectrique calculée pour chaque site et exprimée dans le facteur de réflexion de puissance de Fresnel (ρ_{HH}), lequel entre dans le calcul du coefficient de rétrodiffusion radar. Les figures 8 a et 8 b montrent le comportement du facteur de réflexion avec une croissance de tendance linéaire pour ρ_{HH} aux valeurs MvH_2O inférieures à 30%, et une décroissance vers des valeurs MvH_2O plus élevées.

3.3 Analyse du signal rétrodiffusé du modèle de petite perturbation (SPM)

Le comportement général du signal rétrodiffusé calculé par le modèle SPM est présenté dans le diagramme de dispersion σ°_{HH} vs MvH_2O pour tous les sites (fig. 9). Il est caractérisé par quatre regroupements distincts de tendance linéaire. La répartition des regroupements se concentre aux valeurs MvH_2O autour de 15% à 30%.

On observe également une baisse des valeurs σ°_{HH} à mesure que la pente respective de chaque regroupement diminue, pour atteindre une pente presque nulle aux valeurs σ°_{HH} inférieures à 0,5 dB. En comparant le signal rétrodiffusé avec l'angle d'incidence (fig. 10), les quatre regroupements se caractérisent également par une baisse des valeurs σ°_{HH} correspondant avec l'accroissement de la valeur de l'angle d'incidence. La sensibilité du signal rétrodiffusé est plus forte aux valeurs faibles d'angle d'incidence, soit autour de 45° à 50° aux mêmes conditions d'humidité MvH_2O entre 15% et 30%.

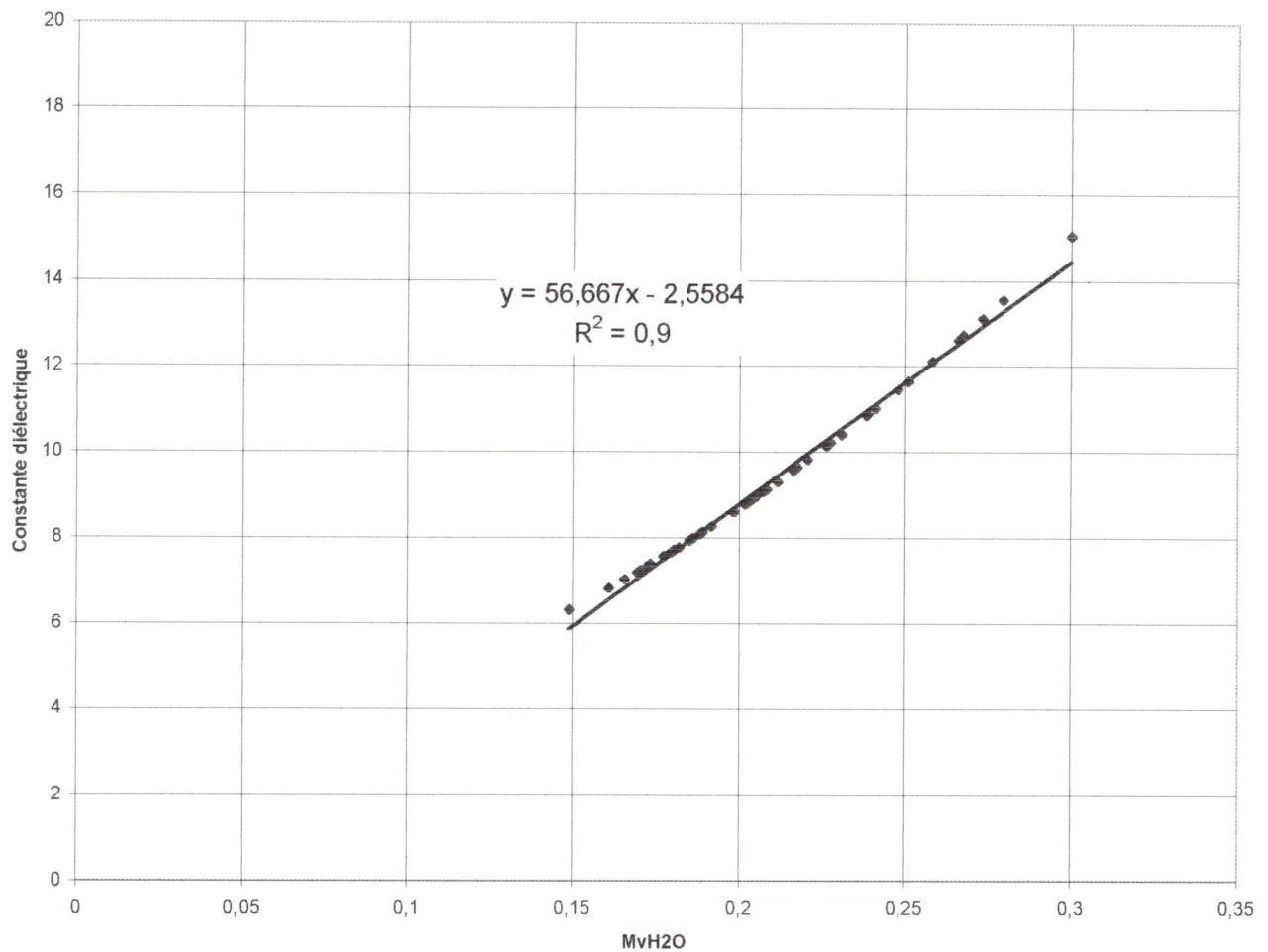


Figure 7a. Portion linéaire de la constante diélectrique calculée en fonction des valeurs MvH₂O inférieures à 30%, pour la texture loam; (MvH₂O 100% = 1).

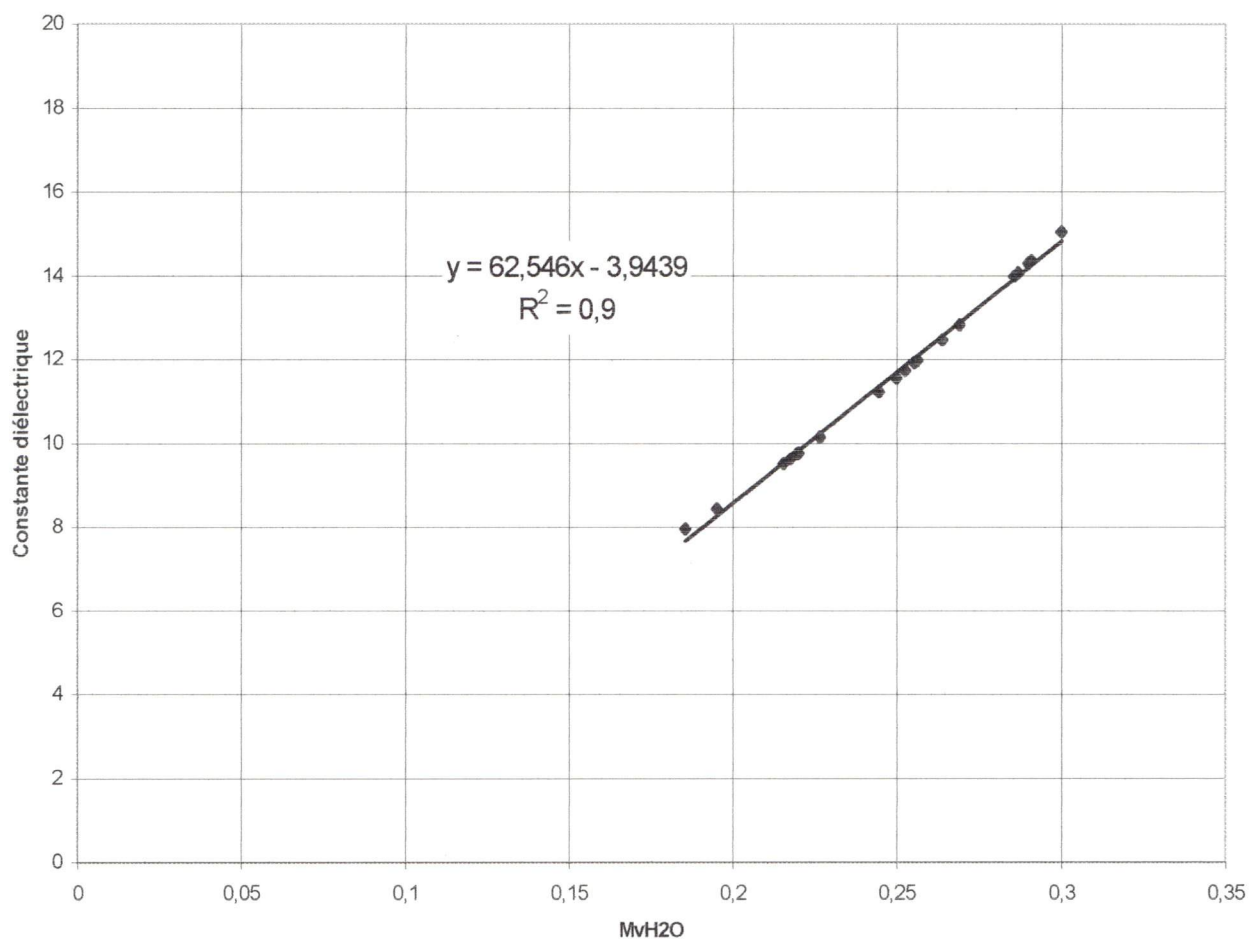


Figure 7b. Portion linéaire de la constante diélectrique calculée en fonction des valeurs MvH_2O inférieures à 30%, pour la texture loam limoneux; (MvH_2O de 100% = 1).

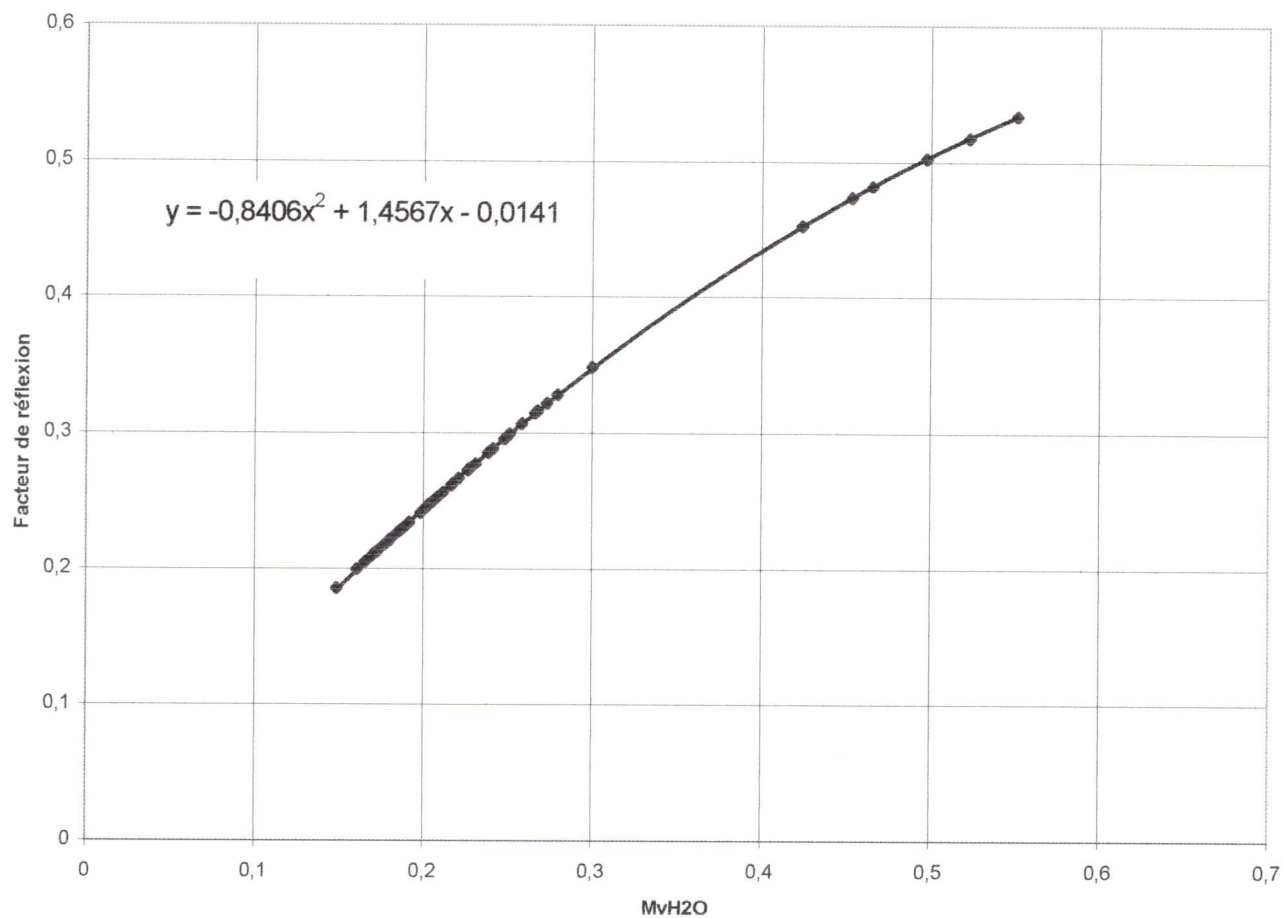


Figure 8a. Courbe du facteur de réflexion ρ_{HH} vs MvH_2O sur les sites de texture loam, à partir des valeurs de constante diélectrique calculées.

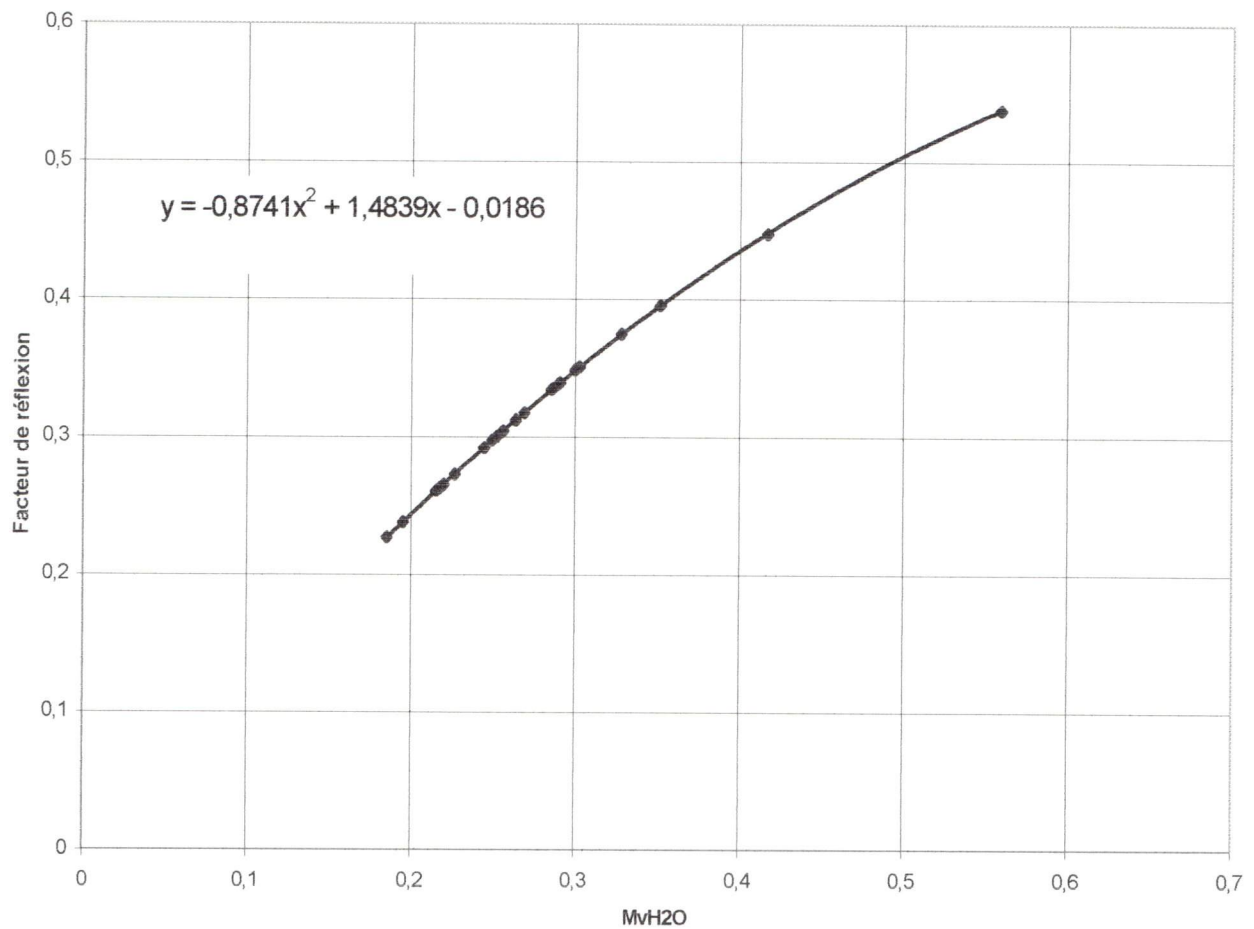


Figure 8b. Courbe du facteur de réflexion ρ_{HH} vs MvH_2O sur les sites de texture loam limoneux, à partir des valeurs de constante diélectrique calculées.

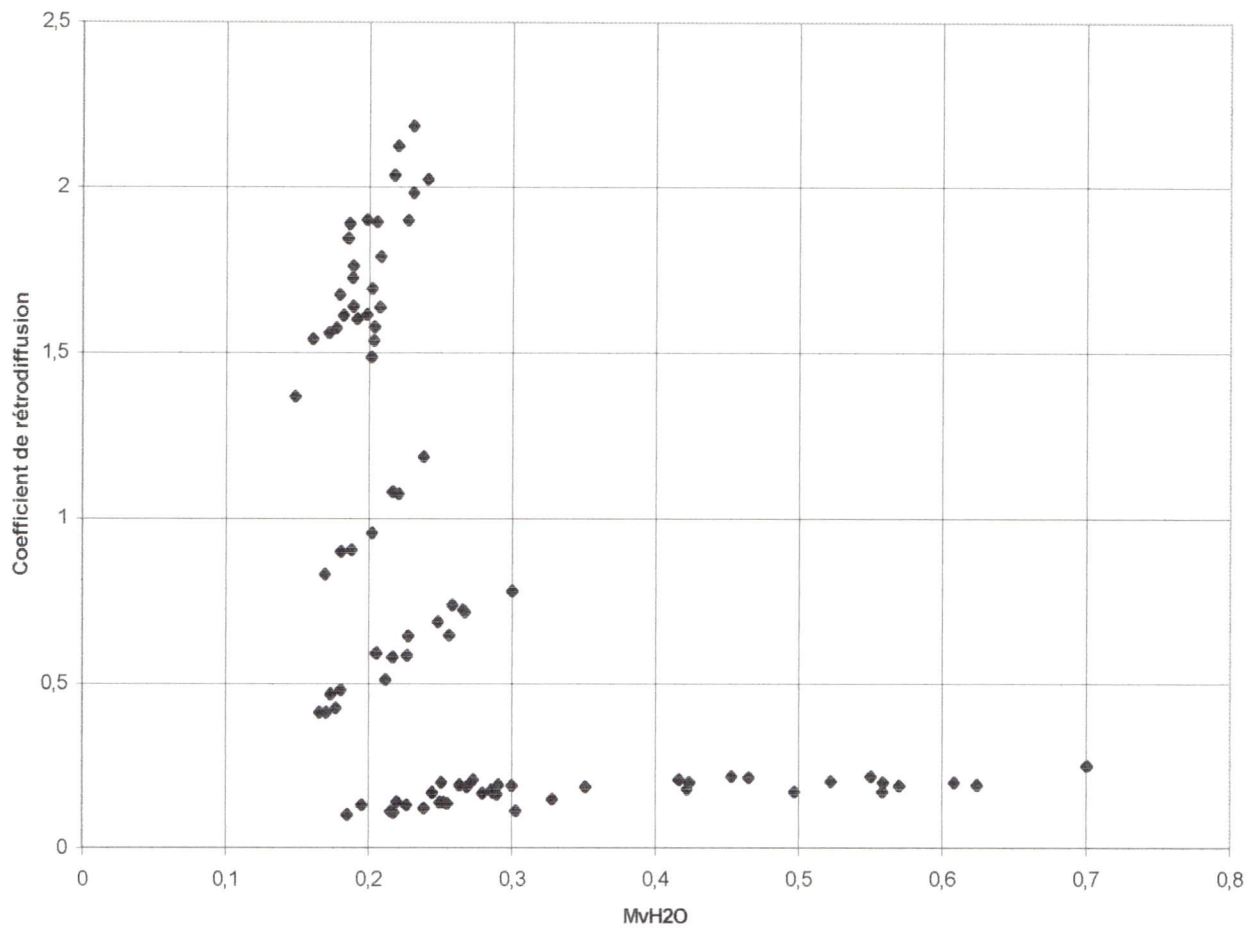


Figure 9. Dispersion du coefficient de rétrodiffusion σ°_{HH} vs MvH_2O selon le modèle SPM, pour tous les sites soumis aux angles d'incidence entre 45° à 70° . RMS = 3,3 cm ; $l = 1,13$ cm.

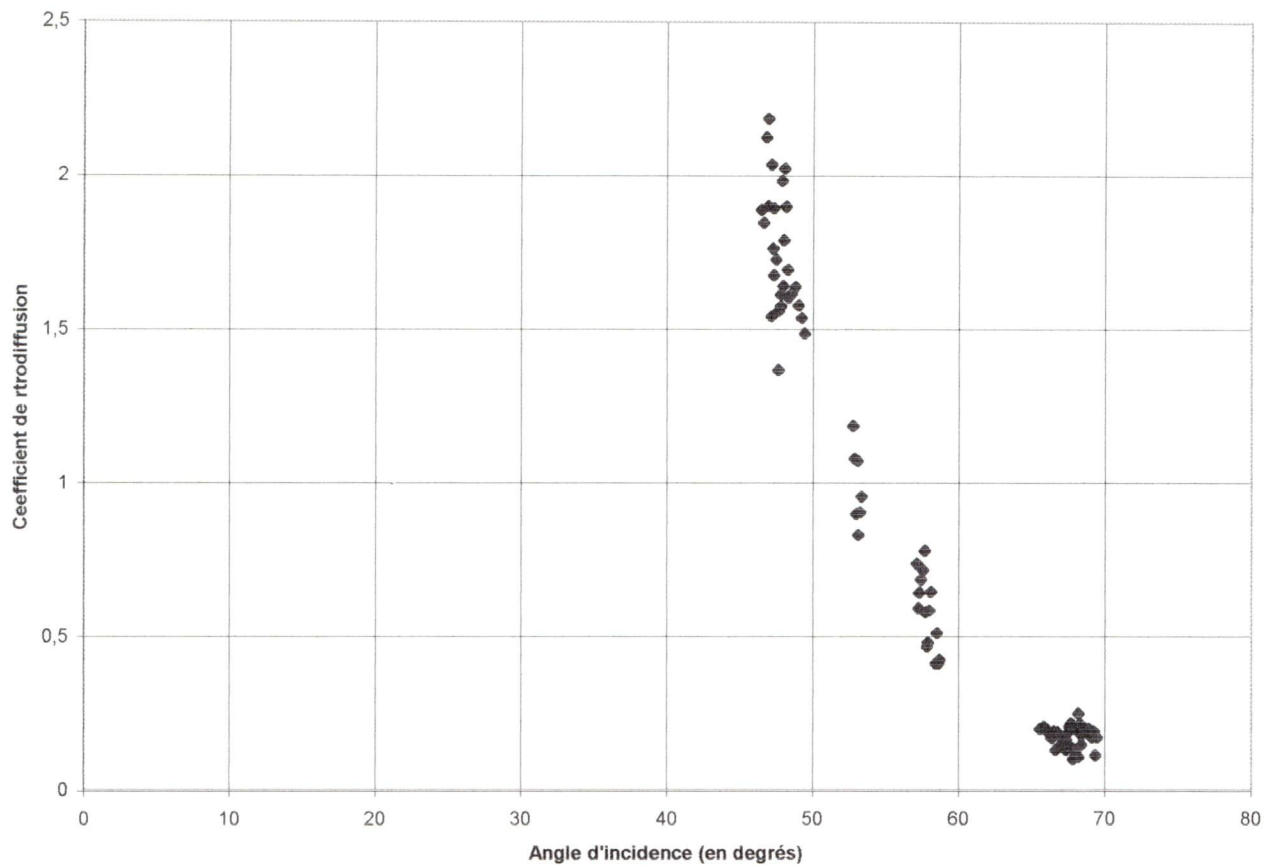


Figure 10. Dispersion du coefficient de rétrodiffusion σ°_{HH} en fonction de l'angle d'incidence selon le modèle SPM, pour la totalité des sites NBCSAR-94.

Le comportement du signal rétrodiffusé par classe de texture de sol est illustré à partir des diagrammes de dispersion σ°_{HH} vs MvH_2O des figures 11a et b. Les sites de texture loam (fig. 11a) affichent un comportement similaire à celui observé à la figure 9, dénombrant quatre regroupements avec des pentes variables qui décroissent à mesure que diminue le signal rétrodiffusé. Les sites de texture loam limoneux (fig. 11b) ont, par contre, des valeurs σ°_{HH} sont en dessous de 0,5 dB. En conséquence, l'examen des diagrammes de dispersion σ°_{HH} en fonction de l'angle d'incidence, pour chaque classe de texture (fig. 12a et b), montre que les sites de texture loam sont distribués de façon plus uniforme sur l'ensemble de l'image radar, soit aux angles d'incidence de 45° à 70° comme le témoignent les quatre regroupements (fig. 12a). Les sites de texture loam limoneux sont d'avantage distribués aux angles d'incidence forts entre 65° et 70° (fig. 12b). Ces graphiques illustrent une population plus forte de sites de texture loam sur l'ensemble des parcelles étudiées, alors que les sites de texture loam limoneux présentent une distribution spatiale restreinte à la portion sud de l'image radar; c'est-à-dire dans les parcelles soumises aux angles d'incidence forts. La proportion de sites de texture loam et de loam limoneux est illustrée sur le diagramme de classification des classes de texture (fig. 13). L'étendue des sites de texture loam est plus large que ceux de texture loam limoneux avec une distribution marginale limitrophe entre ces deux classes de texture.

Il en ressort que la population statistique des sites de texture loam domine également dans la distribution spatiale des deux classes de texture. Par conséquent, il est impossible à ce stade-ci de caractériser la différence entre les deux textures à l'aide du modèle SPM parce que la comparaison entre les deux textures doit se limiter aux angles d'incidence supérieurs. Le comportement du signal σ°_{HH} vs MvH_2O montre que le modèle SPM est sensible aux effets géométriques de rugosité de surface aux angles d'incidence supérieurs, causant une importante atténuation du signal rétrodiffusé. La rugosité de surface (h et l) est exprimée dans les deux premiers termes du modèle SPM :

$$\sigma^{\circ}_{hh} = (4k_0^4 h^2 l^2 \cos^4 \theta) (e^{-(k l \sin \theta)^2}) [\rho_{HH}]^2 \quad (1)$$

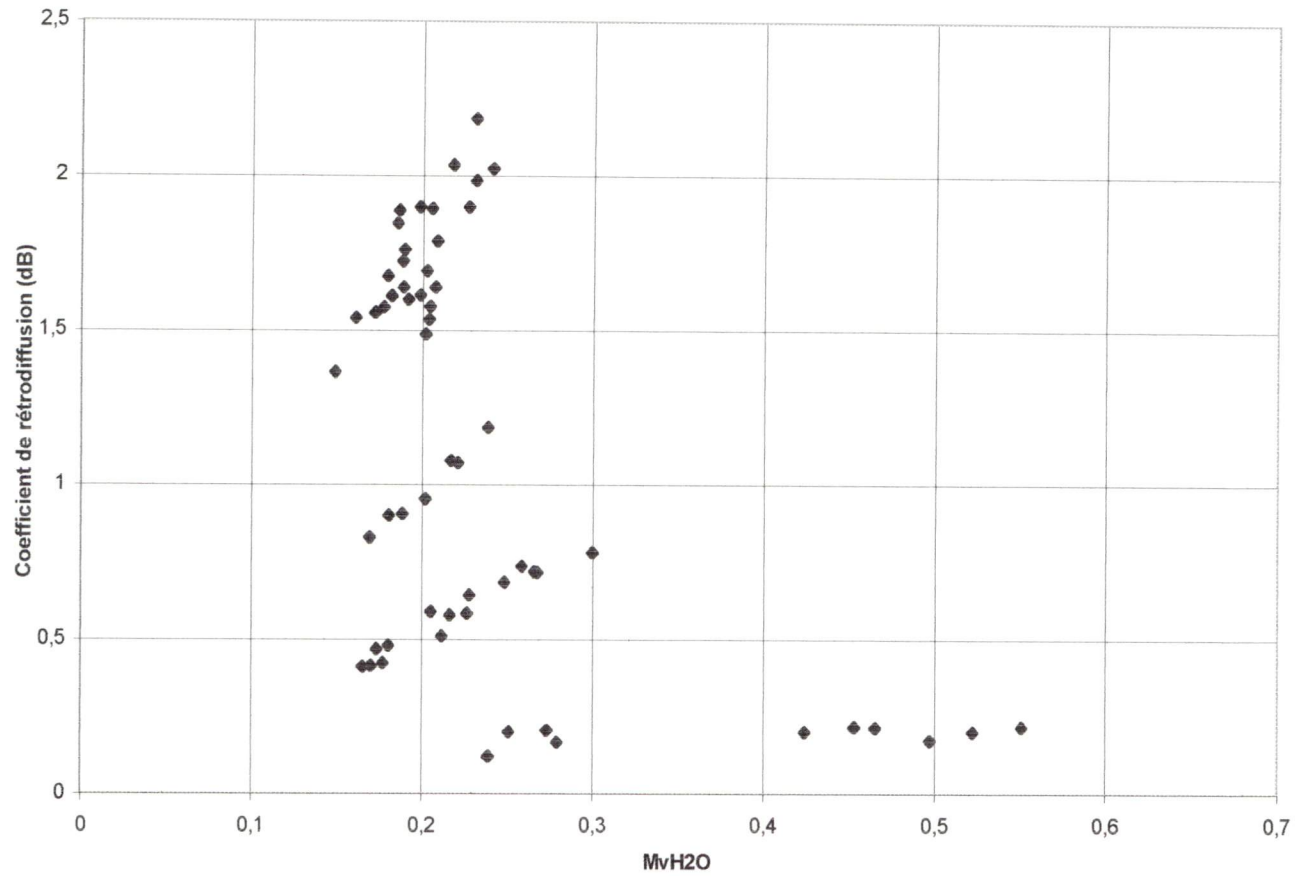


Figure 11a. Dispersion du coefficient de rétrodiffusion σ°_{HH} vs MvH_2O selon le modèle SPM sur les sites de texture loam (aux angles d'incidence entre 45° à 70° : $RMS = 3,3$ cm ; $l = 1,13$ cm).

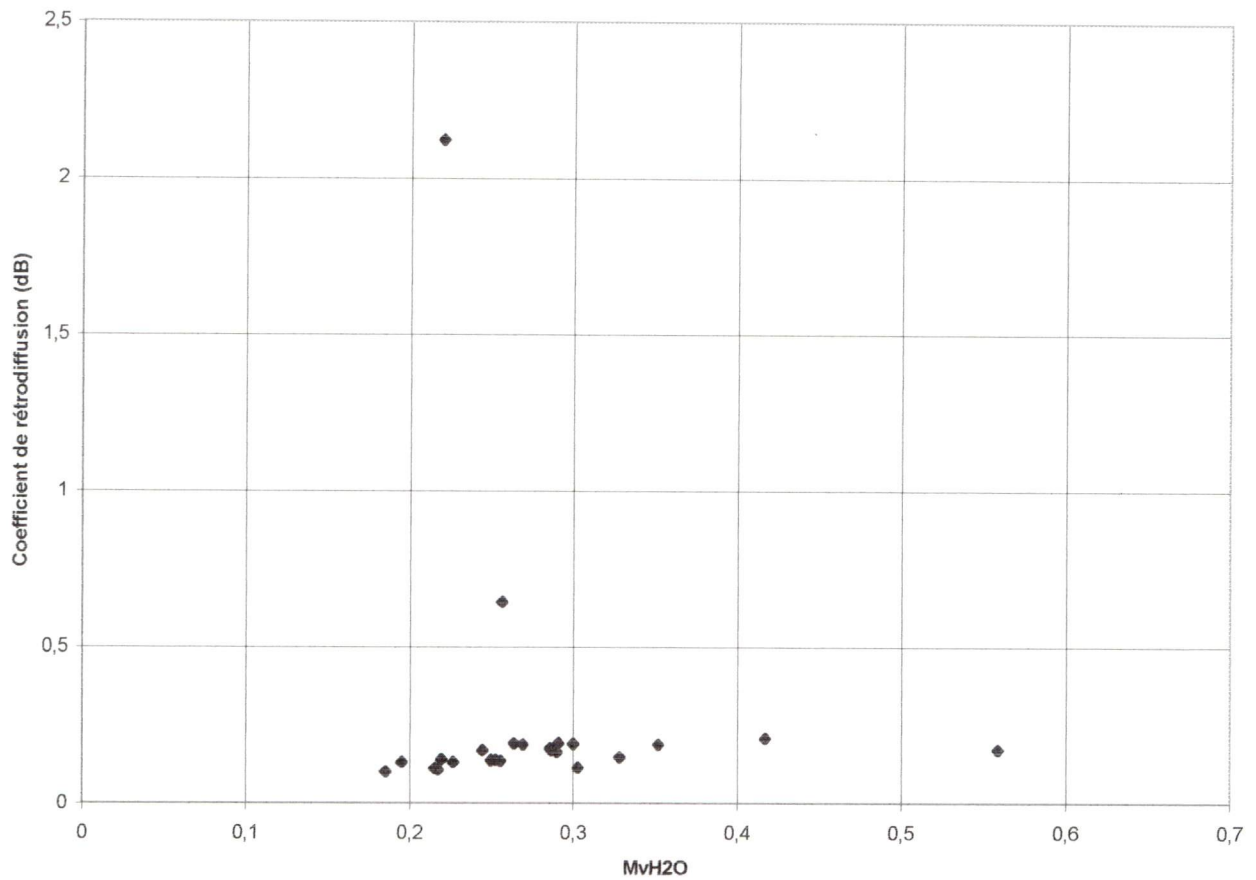


Figure 11b. Dispersion du coefficient de rétrodiffusion σ°_{HH} vs MvH_2O selon le modèle SPM sur les sites de texture loam limoneux (aux angles d'incidence entre 45° à 70° : $RMS = 3,3$ cm ; $l = 1,13$ cm).

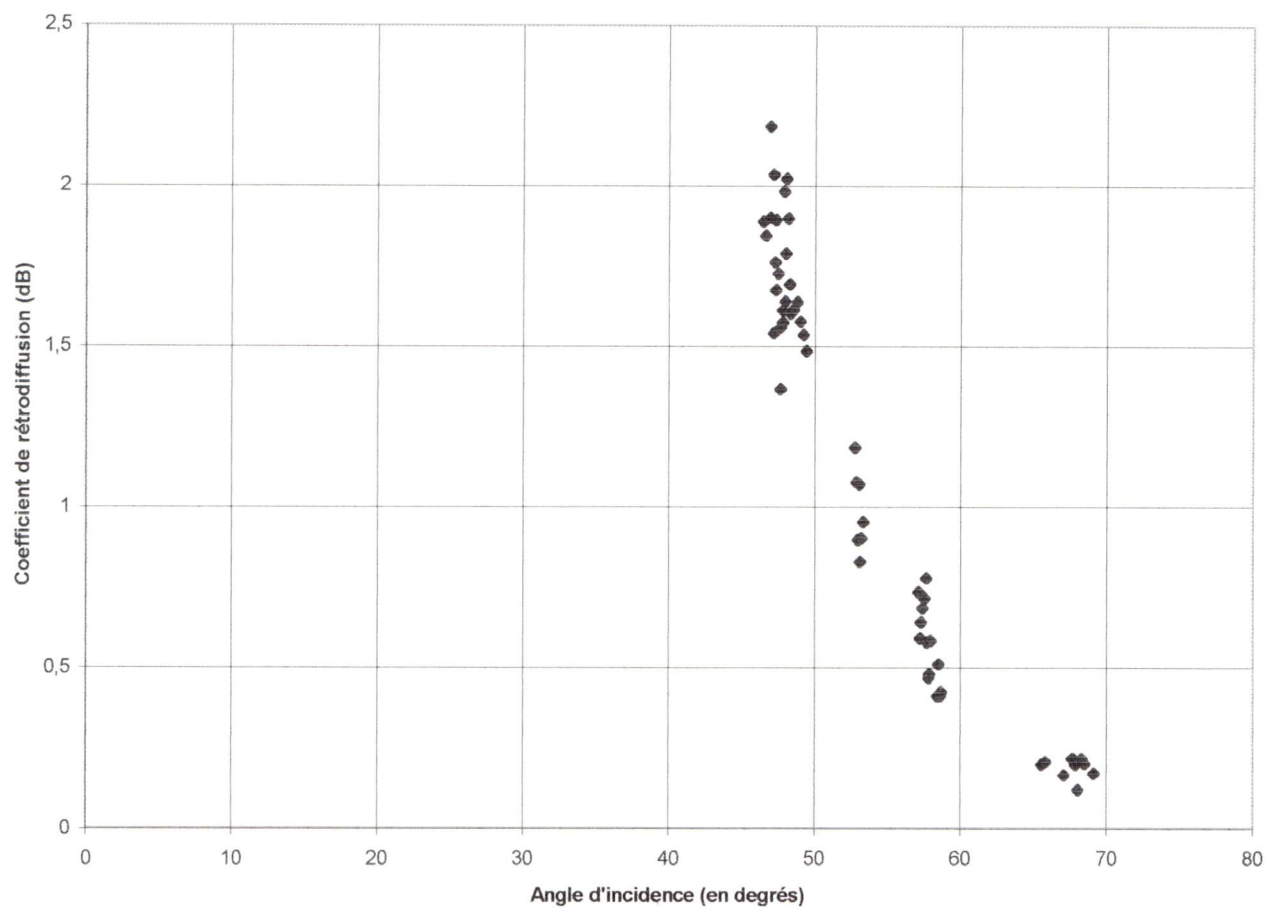


Figure 12a. Dispersion du coefficient de rétrodiffusion σ°_{HH} en fonction de l'angle d'incidence selon le modèle SPM, pour les sites de texture loam.

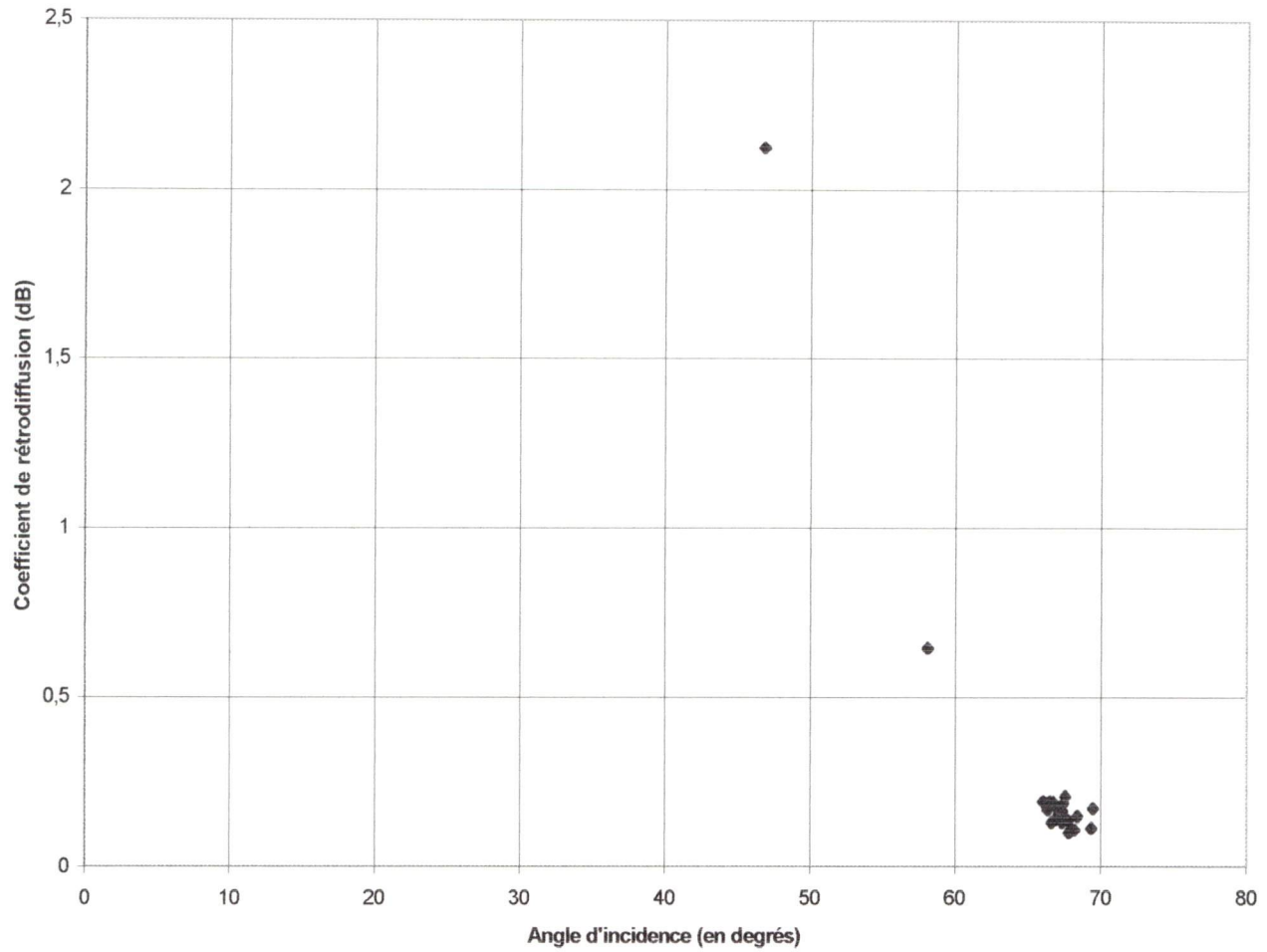


Figure 12b. Dispersion du coefficient de rétrodiffusion σ°_{HH} en fonction de l'angle d'incidence selon le modèle SPM, pour les sites de texture loam limoneux.

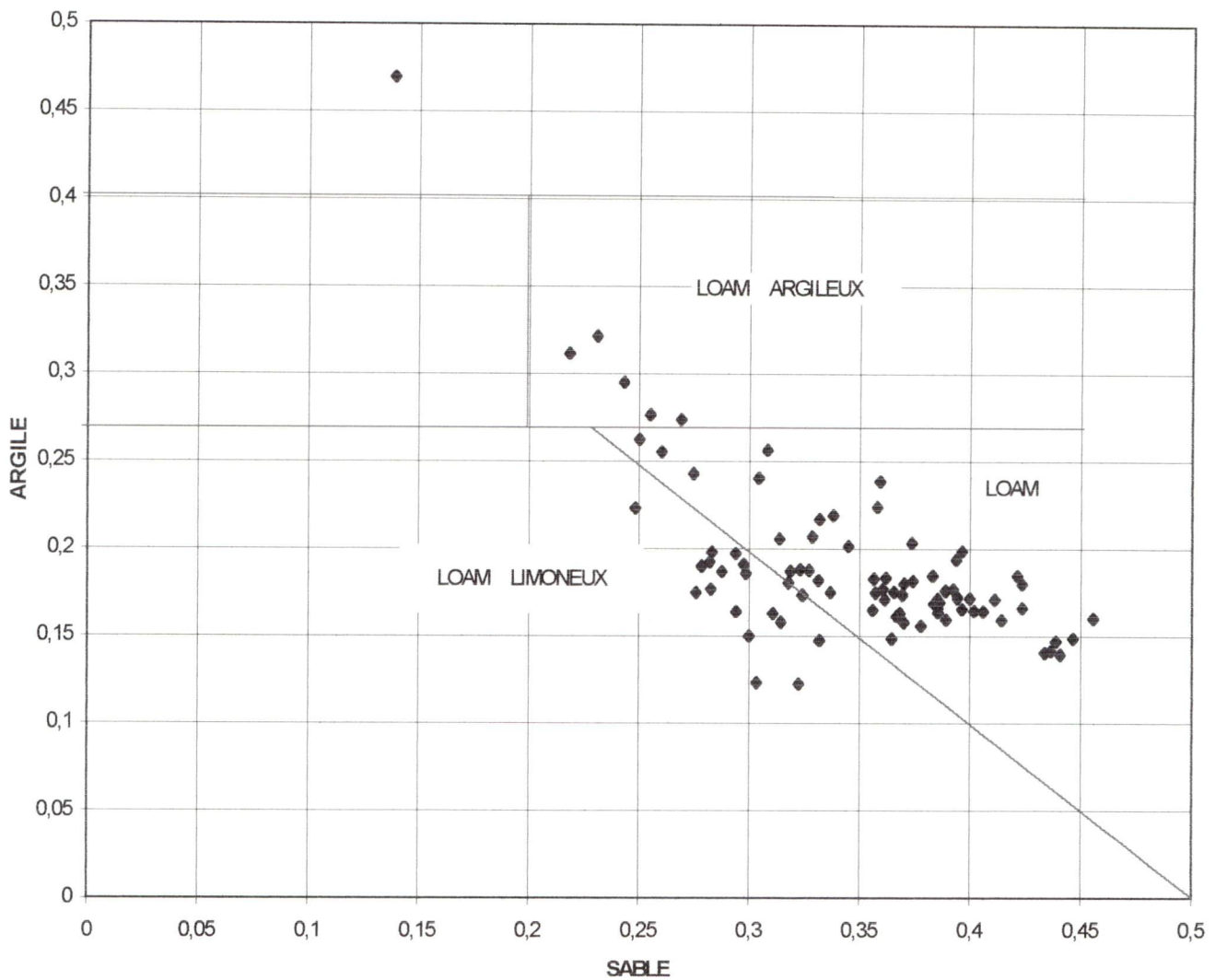


Figure 13. Étendue des classes de texture de sols suivant la proportion sable-argile dans les échantillons de sols, sur tous les sites NBCSAR-94.

3.4 Analyse du signal rétrodiffusé relatif de l'image radar

L'équation 1 du modèle SPM montre la relation entre le facteur de réflexion ρ_{HH} et le coefficient de rétrodiffusion σ^0_{HH} . La valeur calculée de σ^0_{HH} représente une valeur théorique à partir d'un modèle physique et doit, par voie de conséquence, être conforme, ou du moins être corrélative avec la valeur relative $NG^2(dB)$ mesurée au pixel de l'image radar. La valeur relative $NG^2(dB)$ exprimerait donc d'une part le facteur de réflexion ρ_{HH} , et d'autre part l'influence des paramètres géométriques de rugosité de surface et d'angle d'incidence, suivant la longueur d'onde et la polarisation.

Afin de faire ressortir l'influence prépondérante des textures de sols à partir de l'image radar, au détriment des influences géométriques de la rugosité de surface, il est logiquement envisageable de comparer les valeurs $NG^2(dB)$ avec celles du ρ_{HH} correspondantes aux sites de textures loam et ceux de textures loam limoneux. La normalisation des effets de rugosité sera accomplie en calculant le rapport $NG^2(dB)/\rho_{HH}$, pour chaque site d'échantillonnage de sols. Cependant, nous devons d'abord séparer les effets du couvert végétal, et ensuite examiner la variation de MvH_2O comme étant un facteur de ρ_{HH} . Le comportement général du signal $NG^2(dB)$ vs MvH_2O , sur tous les sites, est illustré à la figure 14. Le diagramme de dispersion montre que la sensibilité du signal rétrodiffusé relatif $NG^2(dB)$ augmente aux valeurs MvH_2O inférieures à 30%. Lorsqu'on compare les diagrammes de dispersion $NG^2(dB)$ vs MvH_2O respectifs entre les sols couverts (fig. 15a) et les sols nus (fig. 15b), on observe que la sensibilité du signal est plus forte sur les sols nus que sur les sols couverts. Les sols nus ont des valeurs MvH_2O qui ne dépassent pas 30% à cause d'un assèchement plus prononcé que les sols couverts, lesquels bénéficient de l'humidité additionnelle des végétaux. De façon générale, les sols couverts maintiennent des valeurs $NG^2(dB)$ moins dispersées que pour les sols nus, comme le montrent les coefficients r^2 respectifs des figures 15a et 15b.

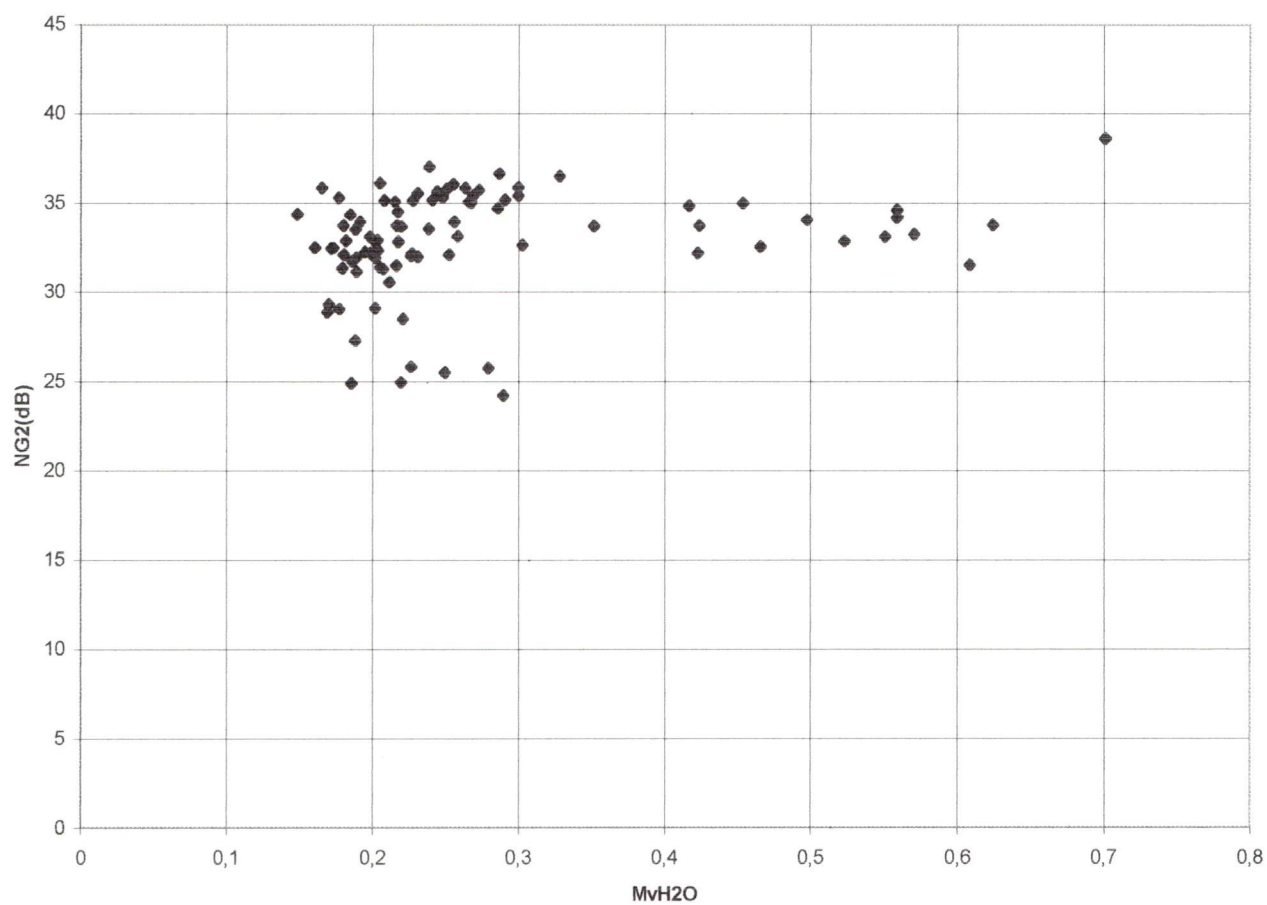


Figure 14. Dispersion des valeurs $NG^2(dB)$ vs MvH_2O sur tous les sites NBCSAR-94.

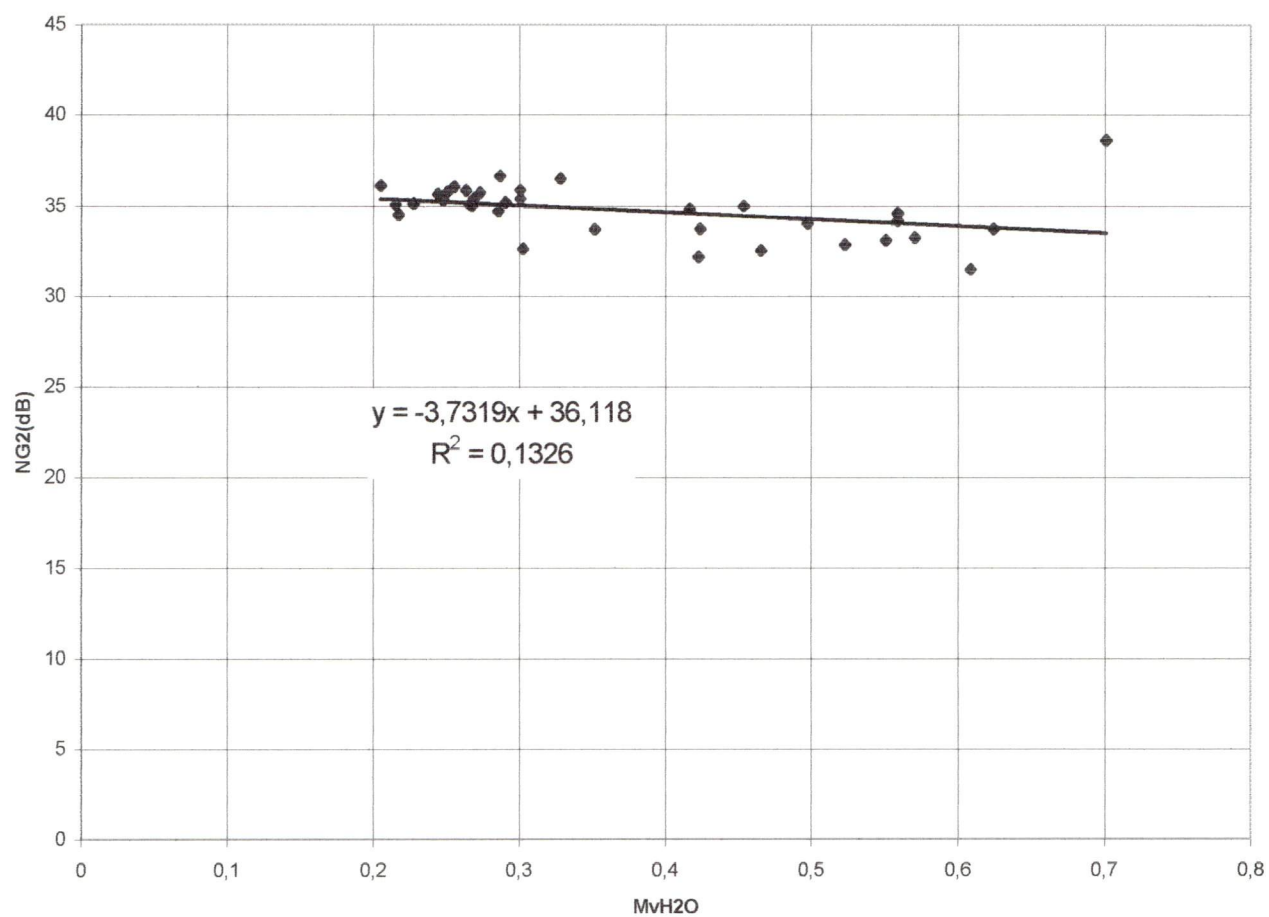


Figure 15a. Dispersion des valeurs $NG^2(dB)$ vs MvH_2O sur les parcelles de sols couverts.

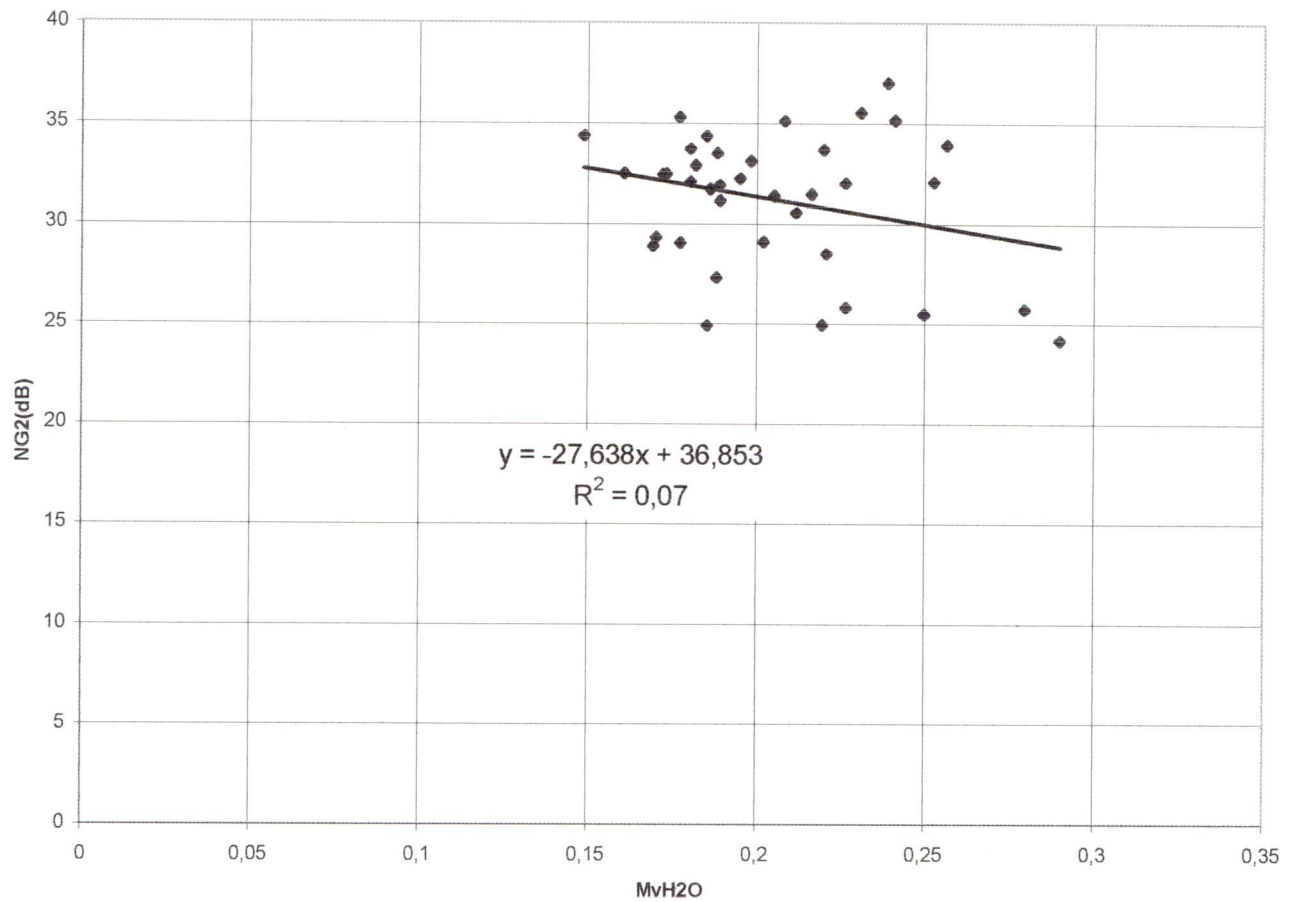


Figure 15b. Dispersion des valeurs $NG^2(dB)$ vs MvH_2O sur les parcelles de sols nus.

Les valeurs $NG^2(\text{dB})$ sur les sols nus représentent donc les valeurs du signal rétrodiffusé que l'on retrouve dans des conditions hydriques de rétention spécifique typique des textures de sols aux valeurs MvH_2O inférieures à 30%. L'examen des diagrammes de dispersion $NG^2(\text{dB})$ vs MvH_2O , pour chacune des classes de texture de sol nu, montre que la tendance du signal $NG^2(\text{dB})$ est plus forte sur les sols de texture loam que ceux de texture loam limoneux aux mêmes conditions d'humidité MvH_2O (fig. 16a et b). Ces graphiques montrent la corrélation entre le signal rétrodiffusé et la teneur en eau volumique avec une distinction évidente entre deux classes de texture de sols. Le comportement du facteur de réflexion de puissance ρ_{HH} pour chacune des deux classes de texture de sols nus est illustré sur les figures 17a et 17b. La relation linéaire est distincte pour les textures loam (fig. 17a), de même que pour les textures loam limoneux (fig. 17b), où les droites se caractérisent par une pente supérieure pour les sites de texture loam, comparativement aux sites de texture loam limoneux.

Afin de vérifier cette relation de proportionnalité entre les textures de sols et les valeurs relatives du signal rétrodiffusé sur une image radar, le rapport $NG^2(\text{dB})/\rho_{HH}$ est utilisé afin de faire ressortir les effets texturaux des sols, en éliminant les effets de rugosité, à partir de la valeur $NG_2(\text{dB})$ au pixel de l'image radar avec comme dénominateur le coefficient de réflexion ρ_{HH} . Ce rapport se définit sous le terme général de paramètre K. Cette nouvelle expression normalise les effets géométriques de la rugosité de surface et favorise l'expression des textures de sols nus vis-à-vis le signal rétrodiffusé relatif $NG^2(\text{dB})$ de l'image radar. En comparant les valeurs du paramètre K respectives à chaque classe de texture de sols en fonction de la valeur MvH_2O , on constate une distinction plus évidente entre les deux textures (Fig. 18a et b), pour tous les angles d'incidence, et aux conditions MvH_2O inférieures à 30%. Les sols de texture loam affichent une tendance de valeurs $NG^2(\text{dB})/\rho_{HH}$ plus hautes que ceux de texture loam limoneux, aux mêmes conditions MvH_2O .

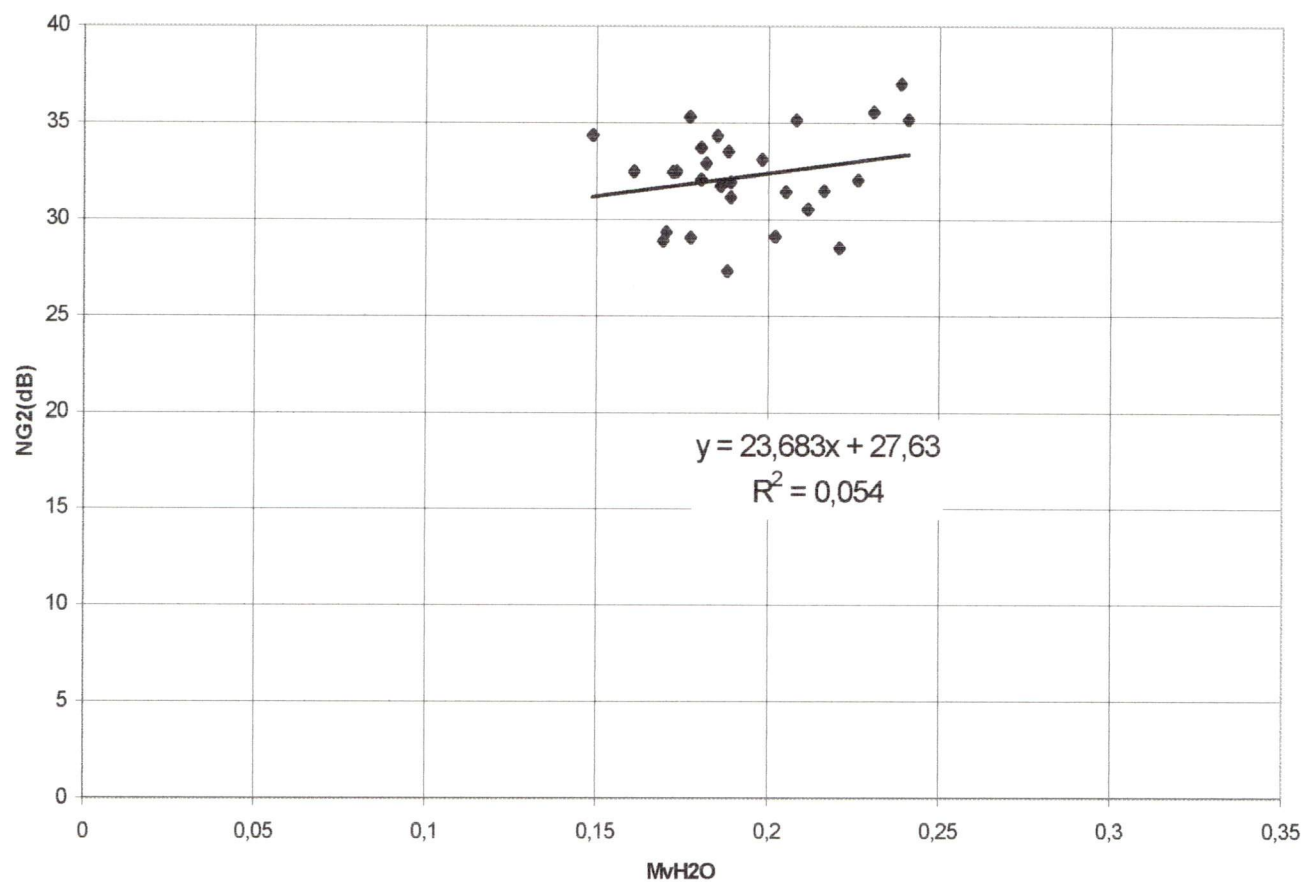


Figure 16a. Dispersion des valeurs $NG^2(\text{dB})$ vs MvH_2O sur les sols nus de texture loam, suivant la classification originale.



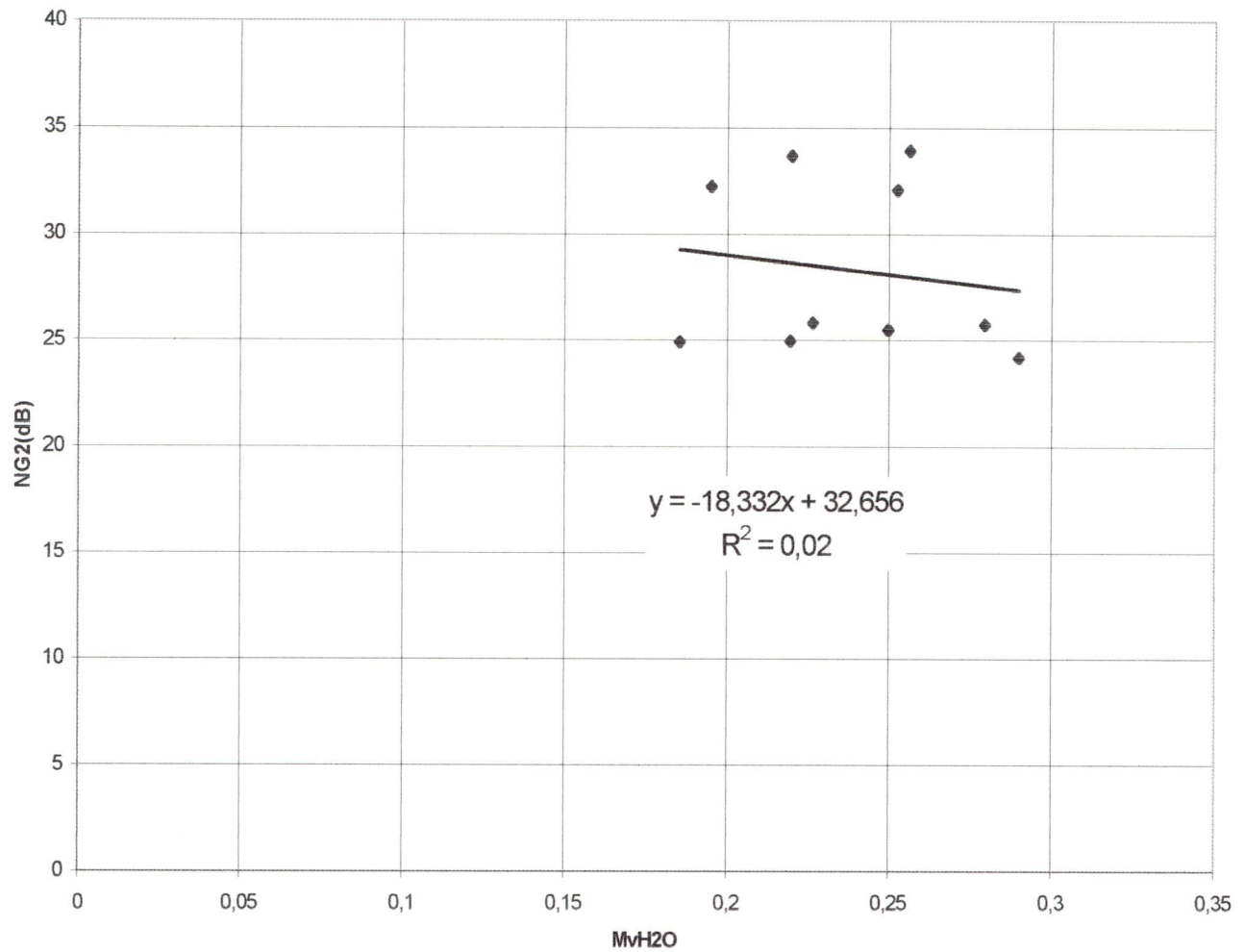


Figure 16b. Dispersion des valeurs $NG^2(dB)$ vs MvH_2O sur les sols nus de texture loam limoneux, suivant la classification originale.

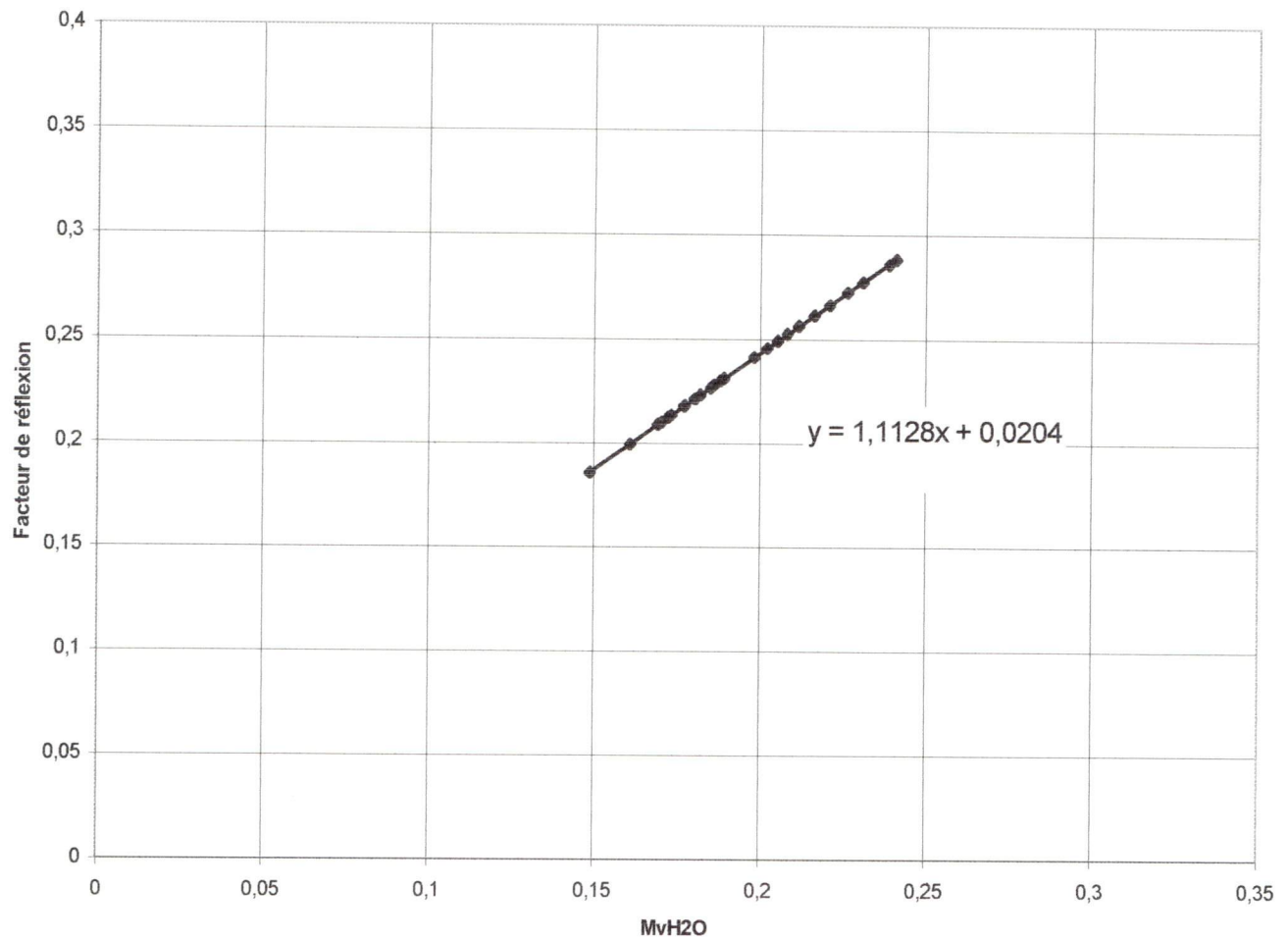


Figure 17a. Portion linéaire de la courbe de réflexion de Fresnel ρ_{HH} vs MvH_2O des sites de texture loam (parcelles de sols nus).

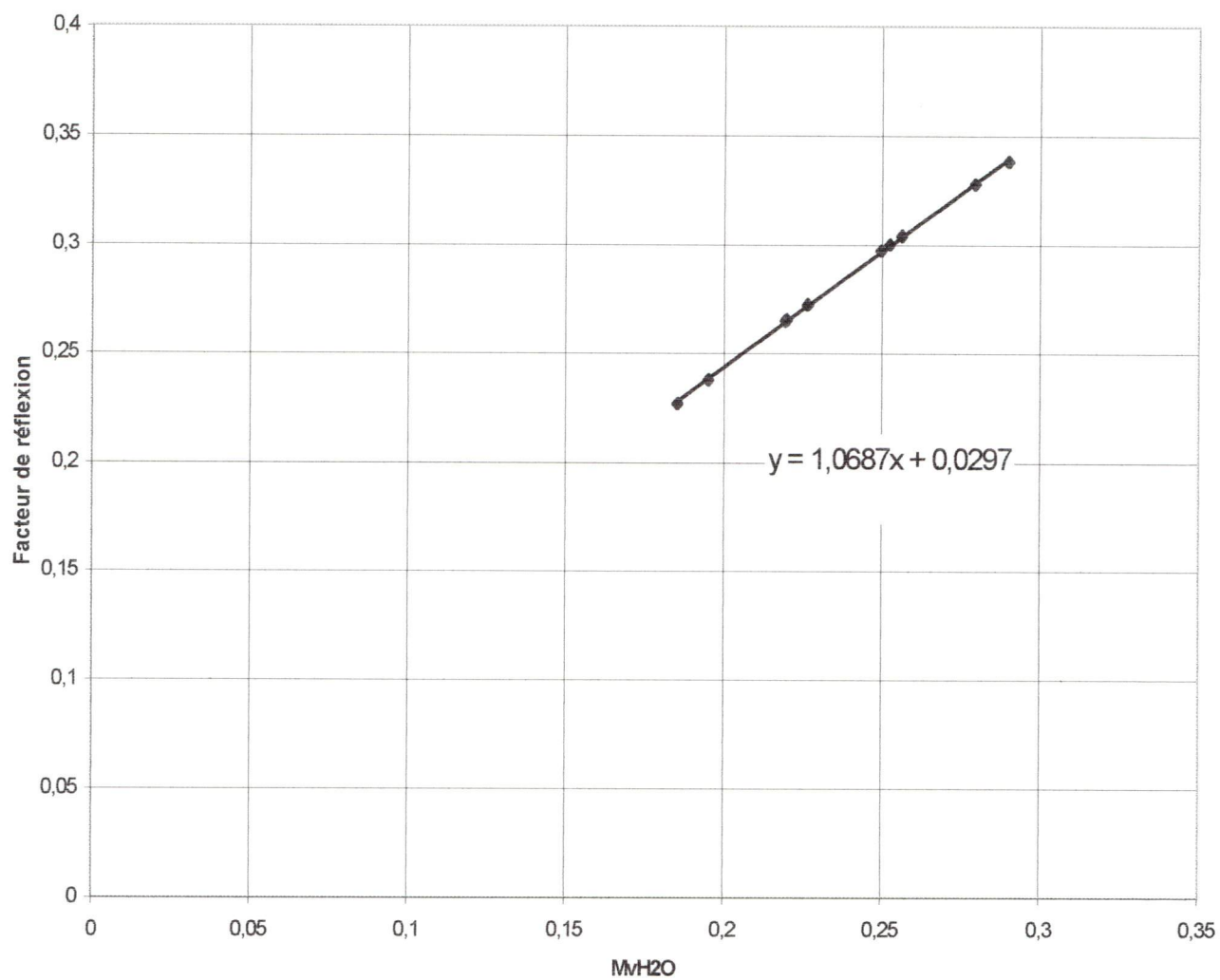


Figure 17b. Portion linéaire de la courbe de réflexion de Fresnel ρ_{HH} vs MvH_2O des sites de texture loam limoneux (parcelles de sols nus).

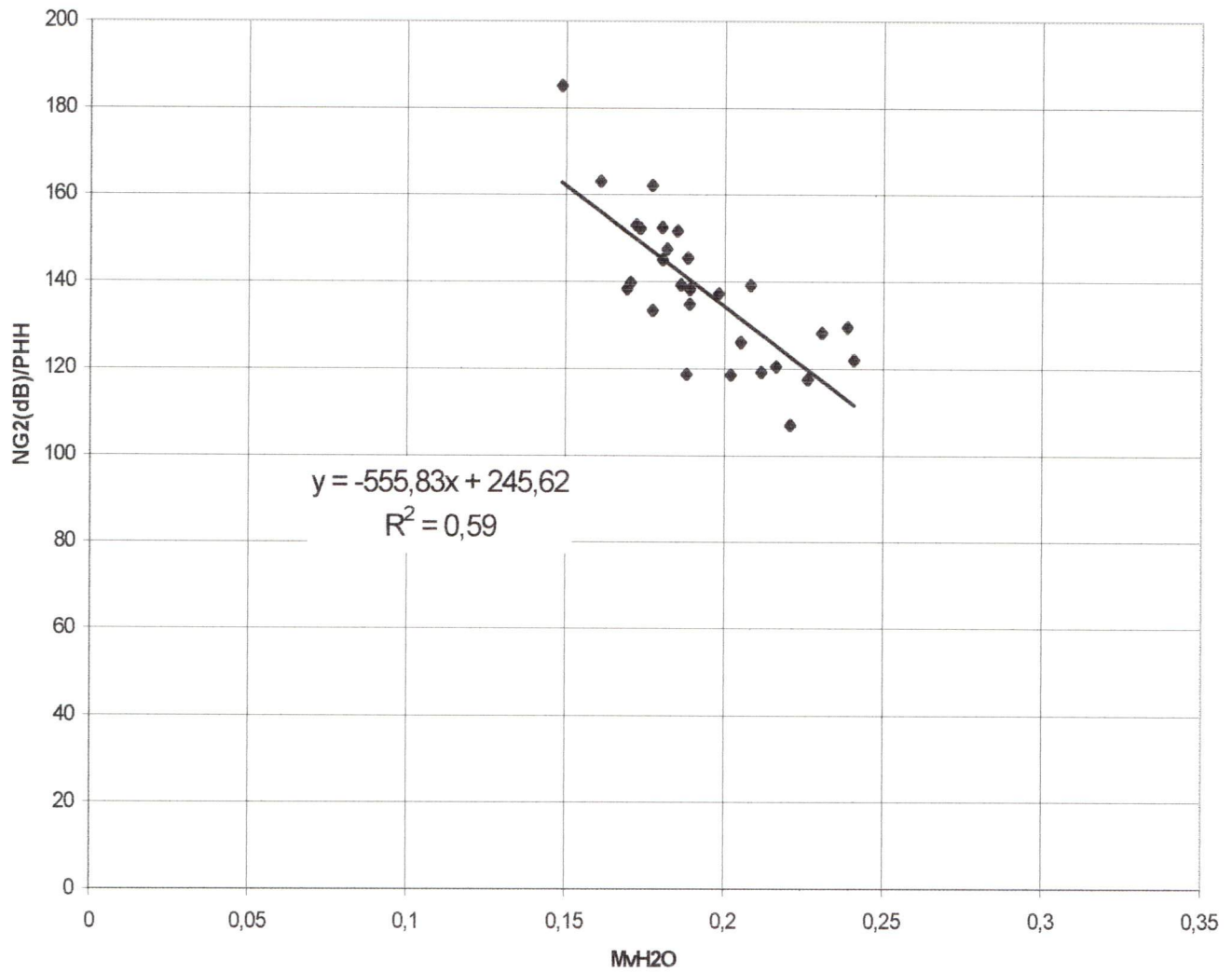


Figure 18a. Dispersion du rapport $NG^2(\text{dB})/\rho_{HH}$ vs MvH_2O sur les sites de texture loam (parcelles de sols nus).



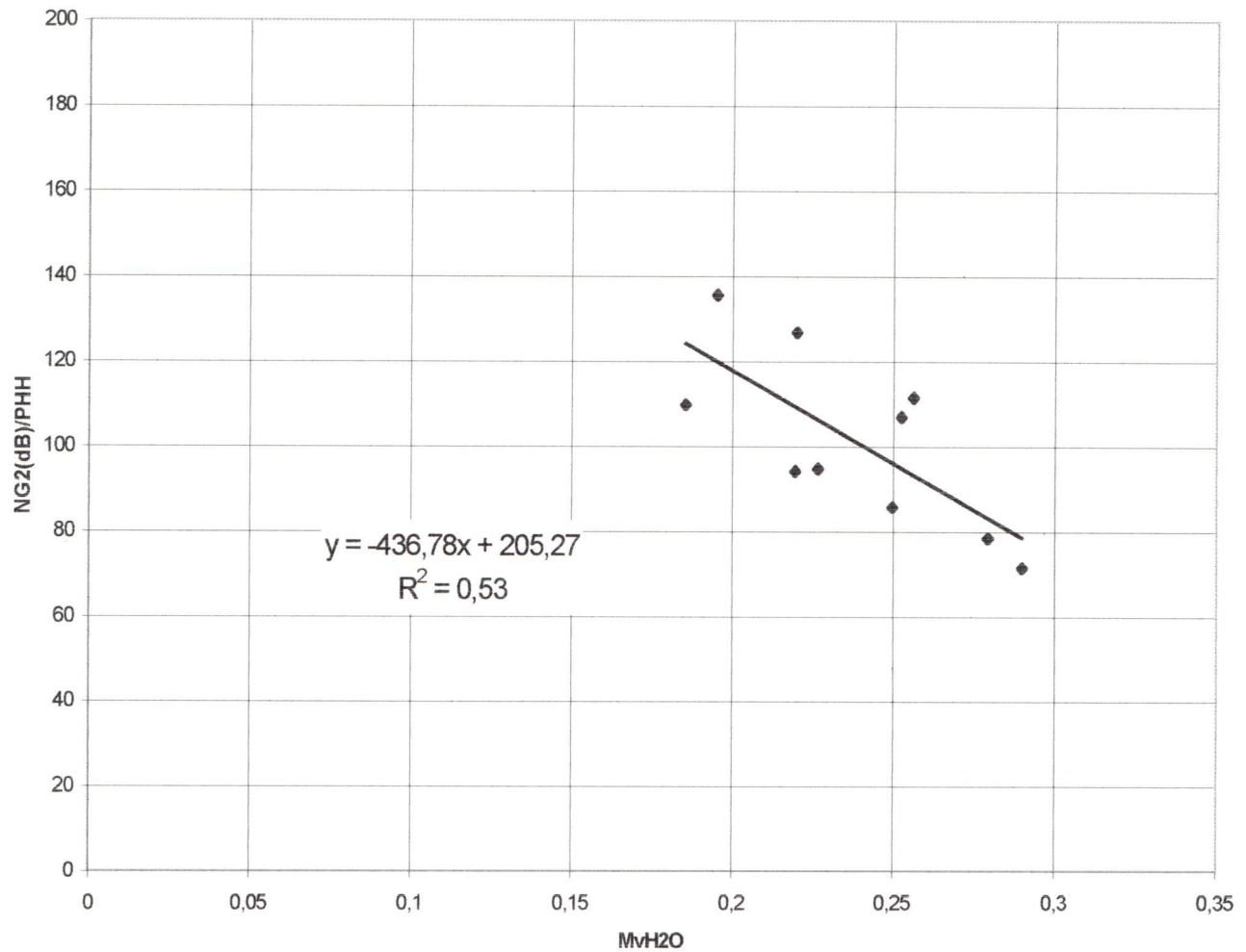


Figure 18b. Dispersion du rapport $NG^2(dB)/\rho_{HH}$ vs MvH_2O sur les sites de texture loam limoneux (parcelles de sols nus).

Ces tendances sont conformes aux résultats précédents des figures 16a et 16b qui montrent que les sols de texture loam ont des valeurs $NG_2(dB)$ plus fortes que celles des sols de texture loam limoneux, ainsi que les pentes de sensibilité différentes. Ces résultats démontrent la nette distinction entre les textures de sols nus, vis-à-vis le signal rétrodiffusé de l'image radar.

3.5 Modélisation du signal rétrodiffusé en fonction des textures de sols nus

À partir des constantes de proportionnalité propres à chaque classe de texture, on obtient une nouvelle valeur calculée $NG^2(dB)K$ qui représente la valeur modélisée du signal rétrodiffusé radar de l'image radar en fonction des classes de textures de sols. L'expression de cette nouvelle valeur est de la forme : $NG^2(dB)K = [m(MvH_2O) + b]$ ρ_{HH} . Les valeurs m et b représentent la pente et l'ordonnée à l'origine propres à chaque classe de texture, déterminées à partir des équations des droites de régression KL pour les textures loam, et KLL pour les textures loam limoneux. Ces modèles furent créés selon les critères de conditions hydriques qui favorisent l'expression des effets des textures de sols, aux valeurs MvH_2O inférieures à 30%.

Le comportement général du signal rétrodiffusé $NG^2(dB)K$, modélisé en fonction de MvH_2O , est illustré à la figure 19. L'examen des courbes $NG^2(dB)K$ vs MvH_2O , calculées pour les deux classes de texture de sols, montre que les sols nus de texture loam présentent des valeurs $NG^2(dB)K$ nettement plus élevées que les sols de texture loam limoneux. Cette différence est plus grande aux conditions MvH_2O entre 15% et 20% et diminue aux valeurs MvH_2O croissantes. La projection des tendances polynomiales respectives à chaque courbe indique que les valeurs $NG^2(dB)K$, vis-à-vis les deux classes de texture de sols, devraient se confondre aux valeurs MvH_2O supérieures à 30%.

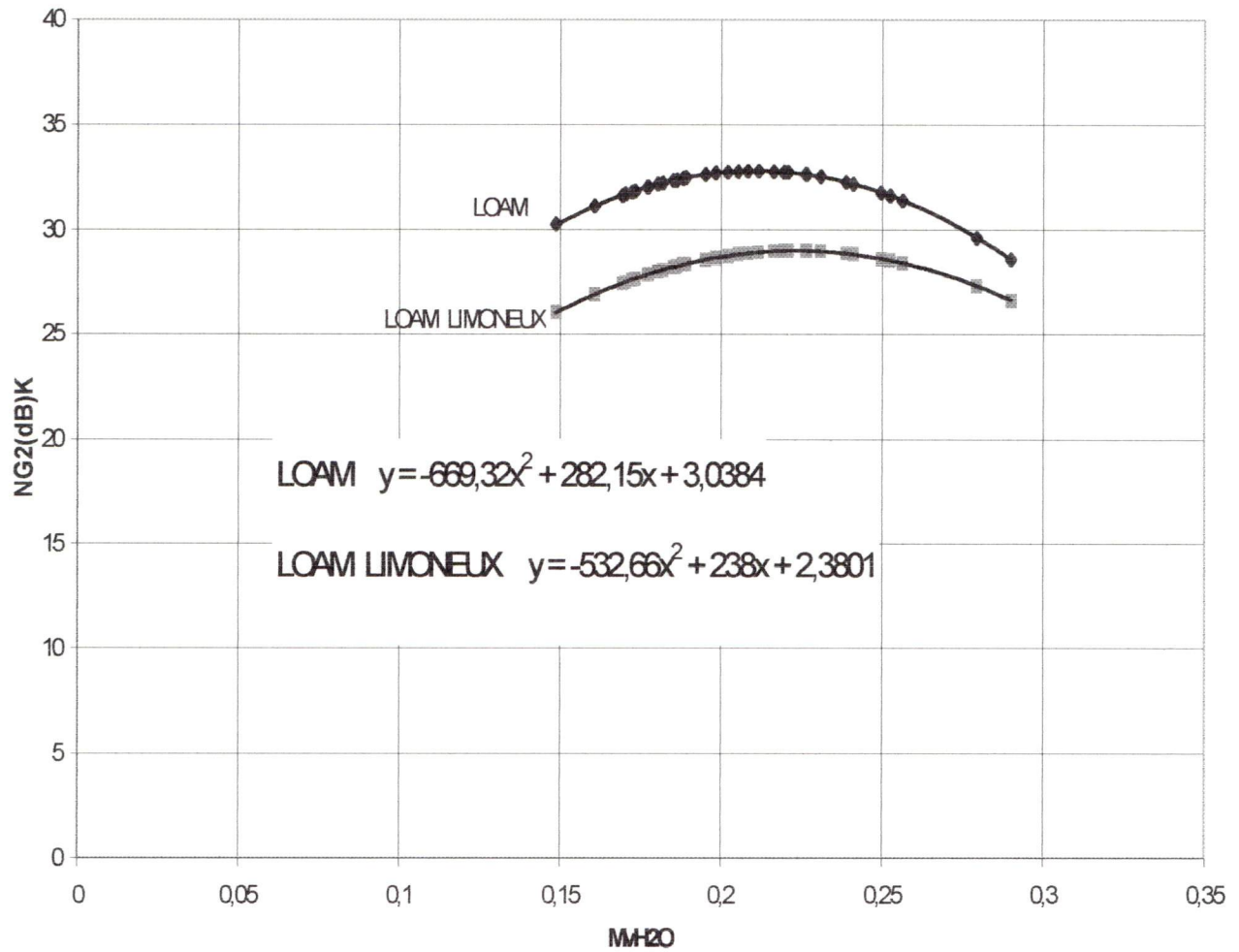


Figure 19. Graphique des courbes $NG^2(dB)K$ vs MvH_2O pour les sols nus selon la classification originale.

En comparant les valeurs originelles $NG^2(dB)$ avec les valeurs modélisées $NG^2(dB)K$ sur les sites de sols nus à partir de l'image radar, chaque site d'échantillonnage est ainsi reclassifié pour sa classe texturale (Tableau 1). Sur un total de 38 échantillons de sol, 27 sites analysés par le nouveau modèle inversé ont des classes de texture conformes aux classes originelles, soit 71%. La moyenne d'erreur est de 6,5% pour les sites de texture loam, et de 14% pour les sites de texture loam limoneux. La précision obtenue dans l'identification des classes de textures originelles démontre la relation existant entre les textures de sols et le signal rétrodiffusé radar.

Afin d'évaluer le comportement du signal $NG^2(dB)$ vs MvH_2O suivant la nouvelle classification, les données furent triées suivant la nouvelle classification de textures de sols afin de déterminer les nouvelles constantes de proportionnalité KL et KLL. Les diagrammes de dispersion $NG^2(dB)K$ vs MvH_2O suivant la nouvelle classification sont illustrés aux figures 20a et 20b. L'examen des nouvelles droites de régression pour chaque classe de texture de sol montre des coefficients de détermination r^2 supérieurs à ceux obtenus avec la classification originale (fig. 18a et b); passant de 0,6 à 0,8 pour les sites de texture loam, et de 0,53 à 0,88 pour les sites de texture loam limoneux.

Le comportement général du signal rétrodiffusé $NG^2(dB)K$ modélisé en fonction de MvH_2O , suivant la nouvelle classification, est illustré à la figure 21. Le diagramme de dispersion montre cette fois, une différence entre les textures qui augmente aux valeurs MvH_2O croissantes; la texture loam conserve cependant des valeurs $NG^2(dB)K$ plus élevées que celles de la texture loam limoneux, conformément à la classification originale. Le comportement $NG^2(dB)K$ vs MvH_2O de la figure 21 diffère avec celui illustré à la figure 19 dans laquelle la différence entre les textures diminue aux valeurs MvH_2O croissantes.

Tableau 1. Classification des sites selon leur classe originale de texture de sol comparée avec la classification du modèle NG²(dB)K.

Classes : Loam = 1 ; Loam Limoneux = 2						
Nouvelle classe	Classe originale	Taux de non conformité	Site No.	Angle Incd degrés	% erreur NG2(dB)KL	% erreur NG2(dB)KLL
1	1	0	F5.11	47,67	11,96	24,19
1	1	0	F7.5	47,17	4,22	17,22
2	1	1	F4.3	53,18	9,47	5,12
2	1	1	F3.14	58,56	7,98	6,38
1	1	0	F7.8	47,68	2,07	15,03
1	1	0	F3.9	57,86	1,96	14,90
1	1	0	F5.12	47,83	9,28	21,15
2	1	1	F3.13	58,72	10,23	4,19
1	1	0	F4.5	52,99	4,68	17,05
1	1	0	F3.10	57,94	0,21	12,80
1	1	0	F7.9	47,84	2,06	14,73
1	1	0	F7.2	46,67	5,90	17,97
1	1	0	F7.1	46,50	2,03	11,02
2	1	1	F4.2	53,27	18,79	3,67
1	1	0	F5.10	47,49	3,16	15,47
1	1	0	F7.10	48,01	1,67	11,24
1	1	0	F7.7	47,32	4,20	9,03
1	1	0	F7.4	47,00	1,34	13,54
2	1	1	F4.1	53,36	12,45	1,29
1	1	0	F7.6	47,34	4,33	8,29
1	1	0	F6.4	48,03	6,68	17,86
2	1	1	F3.15	58,47	7,33	5,38
1	1	0	F3.8	57,77	4,04	8,07
2	1	1	F4.4	53,09	14,79	1,66
1	1	0	F3.11	58,02	1,87	9,52
1	1	0	F6.5	47,93	8,55	18,58
1	1	0	F2.11	68,07	12,88	22,08
1	1	0	F6.3	48,11	8,53	18,08
2	2	0	F2.10	67,83	29,82	13,18
1	2	1	F2.5	66,66	1,11	11,51
2	2	0	F2.6	66,89	31,13	16,05
1	2	1	F7.3	46,84	2,83	13,99
2	2	0	F2.17	67,36	26,32	12,20
2	2	0	F2.9	67,60	24,60	12,21
1	2	1	F2.16	67,58	1,51	11,14
1	2	1	F3.12	58,10	7,49	16,31
2	2	0	F2.7	67,12	14,99	5,98
2	2	0	F2.8	67,36	18,14	9,97
Sites Total		Sites bons			Moy %erreur	Moy %erreur
38		27			KL	KLL
% conforme		71			6,52	14,02

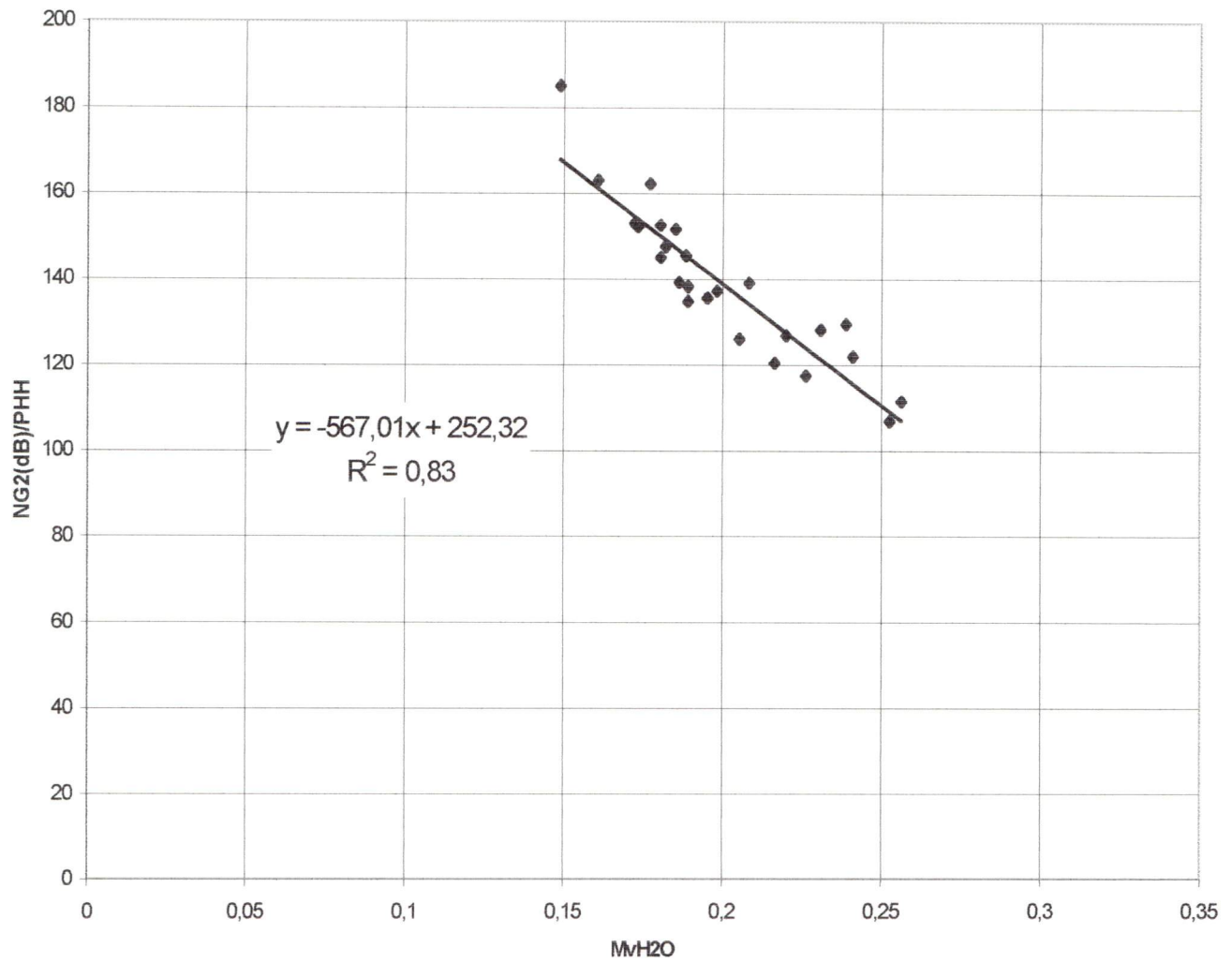


Figure 20a. Dispersion du rapport $NG^2(dB)/pHH$ vs MvH_2O des sols nus de texture loam, suivant la nouvelle classification.

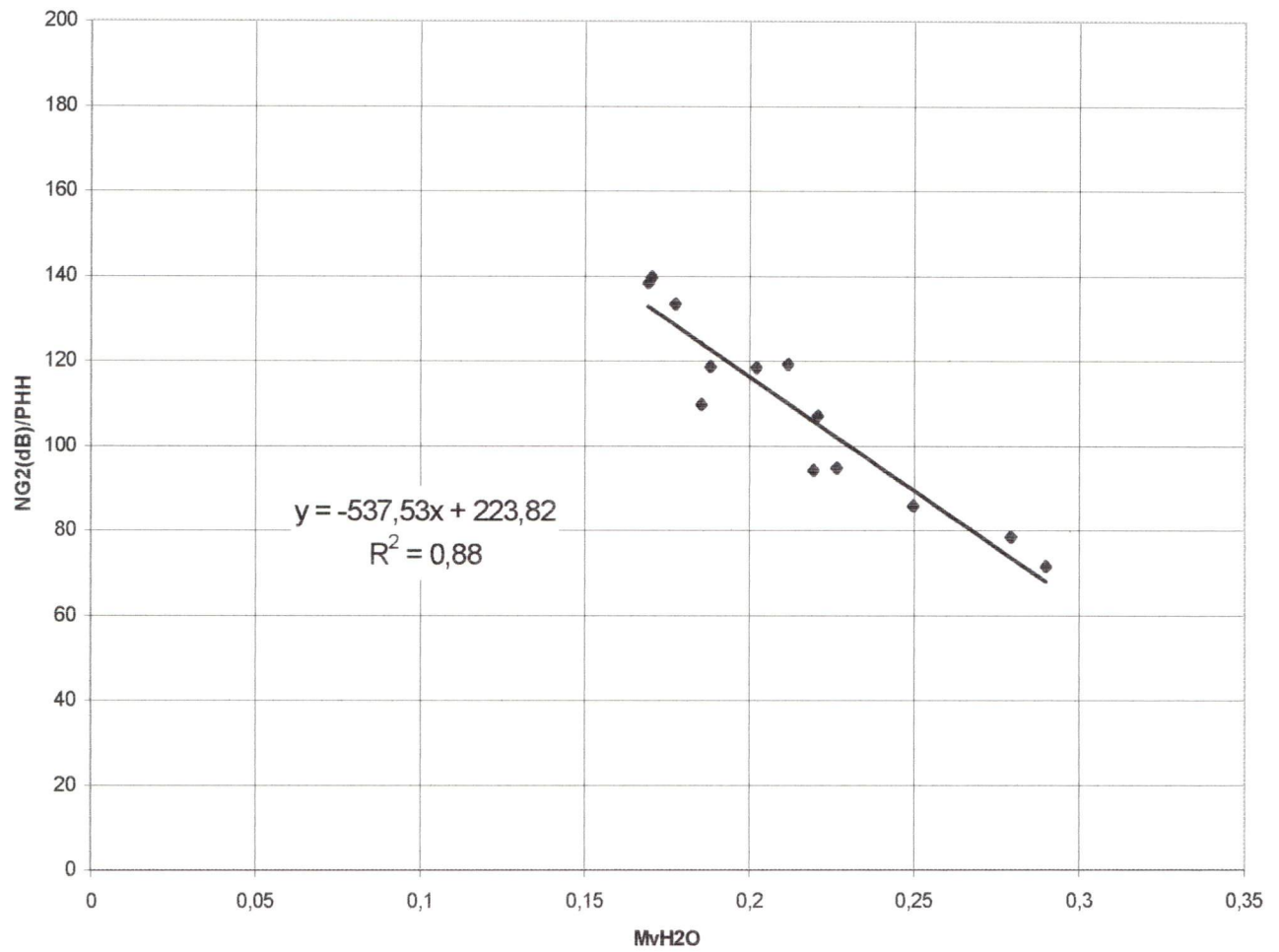


Figure 20b. Dispersion du rapport $NG^2(dB)/\rho_{HH}$ vs MvH_2O des sols nus de texture loam limoneux, suivant la nouvelle classification.

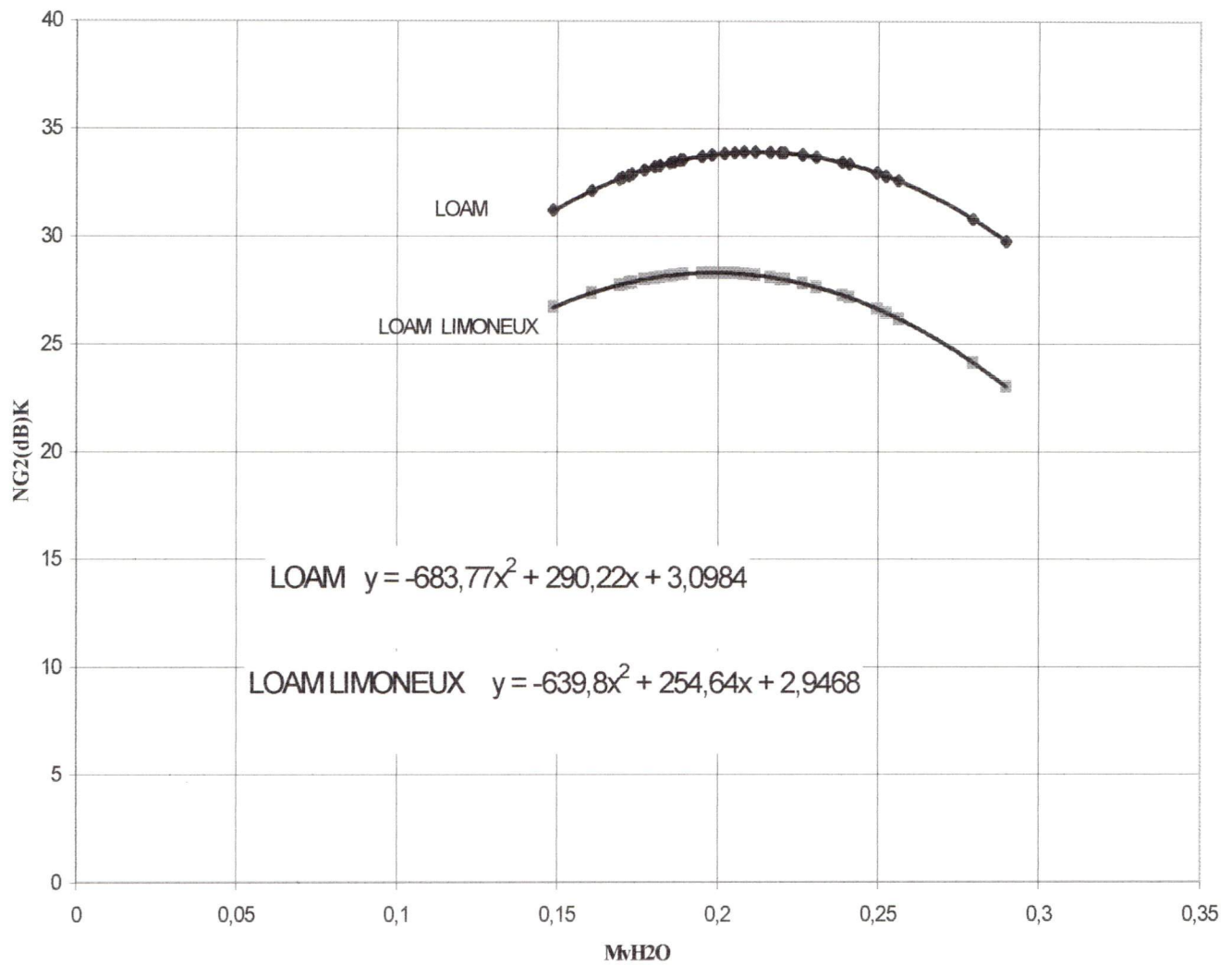


Figure 21. Graphique des courbes $NG^2(dB)K$ vs MvH_2O pour les sols nus, suivant la nouvelle classification.

Le taux de conformité dans l'identification des classes de textures selon la nouvelle classification donne la même précision de 71%, soit 27 sites sur 38 qui correspondent aux textures originales. Cependant, la moyenne d'erreur pour chacune des classes de textures est améliorée en passant de 6,5% à 4,15% pour la texture loam, et de 14% à 5,6%, pour la texture loam limoneux (Tableau 2). Les valeurs $NG^2(dB)$ relatives de l'image radar conformes à la nouvelle classification des textures de sols furent comparées, dans une deuxième itération, avec les valeurs MvH_2O afin d'évaluer les corrélations respectives suivant les classes de texture de sols (Fig. 22a et b). Les droites de régression de chacune des classes de texture montrent une amélioration dans les valeurs des coefficients de détermination, si on compare les valeurs r^2 qui passent de 0,05 à 0,06 pour la texture loam, et de 0,02 à 0,37 pour la texture loam limoneux. L'amélioration est plus significative pour la texture loam limoneux.

Par une troisième itération, suivant le nouveau modèle, on parvient ainsi à regrouper les sites selon leur classe respective de texture de sols afin d'obtenir le maximum de corrélation possible entre le rapport $NG^2(dB)/\rho_{HH}$ vs MvH_2O . Les résultats de ce triage sont illustrés aux figures 23a et 23b des r^2 de 0,9 pour la classe de texture loam, contre 0,83 pour la classe de texture loam limoneux. Les nouvelles équations linéaires KL et KLL permettent le calcul des nouvelles courbes $NG^2(dB)K$ vs MvH_2O (fig. 24).

Le comportement des courbes respectives à chaque classe de texture montre une baisse significative du signal $NG^2(dB)K$ aux valeurs MvH_2O supérieures à 20%. La courbe de texture loam illustre un comportement différent de celle de texture loam limoneux avec une persistance plus soutenue des valeurs $NG^2(dB)K$ plus fortes autour de la valeur MvH_2O de 20%. La différence entre les deux classes de texture est plus grande aux valeurs MvH_2O croissantes, avec des valeurs $NG^2(dB)K$ plus hautes pour la texture loam.

Tableau 2. Classification des sites selon leur texture de sol suivant le modèle NG²(dB)K, comparée avec la classification originale.

Classes : Loam = 1; Loam Limoneux = 2						
Nouvelle Classe	Classe originale	Taux de conformité	Site No.	Angle Inciden degrés	% erreur NG2(dB)KL	% erreur NG2(dB)KLL
1	1	0	F5.11	47,67	9,22	22,27
1	1	0	F7.5	47,17	1,19	15,78
1	1	0	F7.8	47,68	1,08	14,25
1	1	0	F3.9	57,86	1,20	14,19
1	1	0	F5.12	47,83	6,35	20,72
1	1	0	F4.5	52,99	1,58	16,81
1	1	0	F3.10	57,94	3,47	12,55
1	1	0	F7.9	47,84	1,13	14,58
1	1	0	F7.2	46,67	2,82	18,04
1	1	0	F7.1	46,50	5,38	11,17
1	1	0	F5.10	47,49	0,03	15,78
1	1	0	F7.10	48,01	5,02	11,60
1	1	0	F7.7	47,32	7,63	9,41
1	2	1	F2.5	66,66	4,47	12,33
1	1	0	F7.4	47,00	1,96	14,58
1	1	0	F7.6	47,34	7,85	9,99
1	1	0	F6.4	48,03	3,51	19,61
1	1	0	F3.8	57,77	7,63	10,77
1	2	1	F7.3	46,84	0,54	16,84
1	1	0	F3.11	58,02	5,45	13,15
1	1	0	F6.5	47,93	5,30	22,25
1	1	0	F2.11	68,07	9,74	26,34
1	1	0	F6.3	48,11	5,22	22,78
1	2	1	F2.16	67,58	2,15	17,58
1	2	1	F3.12	58,10	4,02	22,84
2	1	1	F4.3	53,18	12,97	4,05
2	1	1	F3.14	58,56	11,44	5,39
2	1	1	F3.13	58,72	13,79	3,68
2	2	0	F2.10	67,83	34,07	13,05
2	1	1	F4.2	53,27	22,69	3,33
2	1	1	F4.1	53,36	16,23	2,82
2	1	1	F3.15	58,47	10,99	7,71
2	2	0	F2.6	66,89	35,68	12,26
2	1	1	F4.4	53,09	18,78	1,81
2	2	0	F2.17	67,36	30,76	7,68
2	2	0	F2.9	67,60	29,20	4,50
2	2	0	F2.7	67,12	19,60	6,26
2	2	0	F2.8	67,36	23,03	4,93
Sites Total		Sites bons			Moy % erreur	Moy % erreur
38		27			KL	KLL
% conforme		71			4,16	5,96

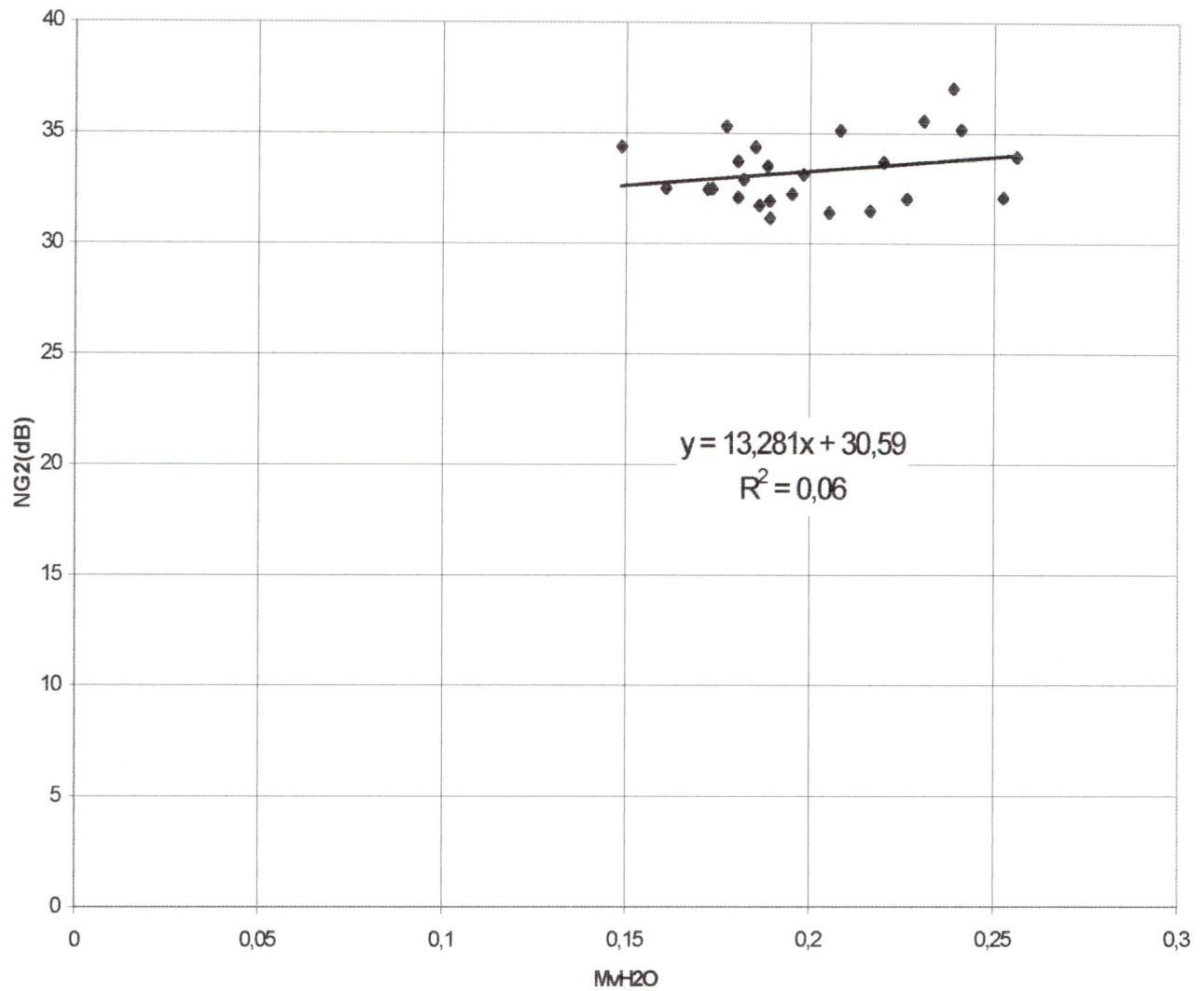


Figure 22a. Dispersion des valeurs $NG^2(dB)$ vs MvH_2O sur les sols nus de texture loam, suivant la nouvelle classification.

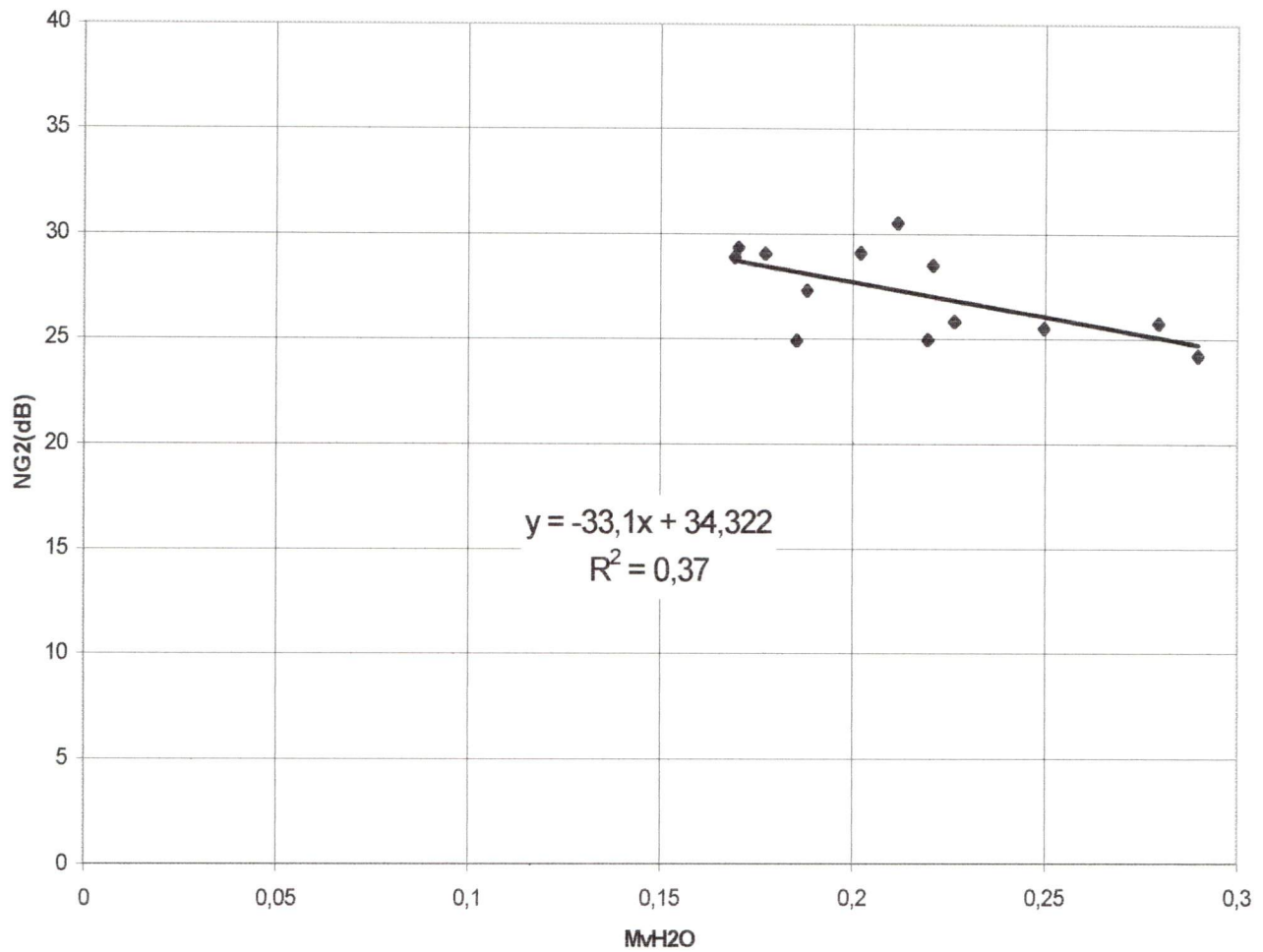


Figure 22b. Dispersion des valeurs $NG^2(dB)$ vs MvH_2O sur les sols nus de texture loam limoneux, suivant la nouvelle classification.

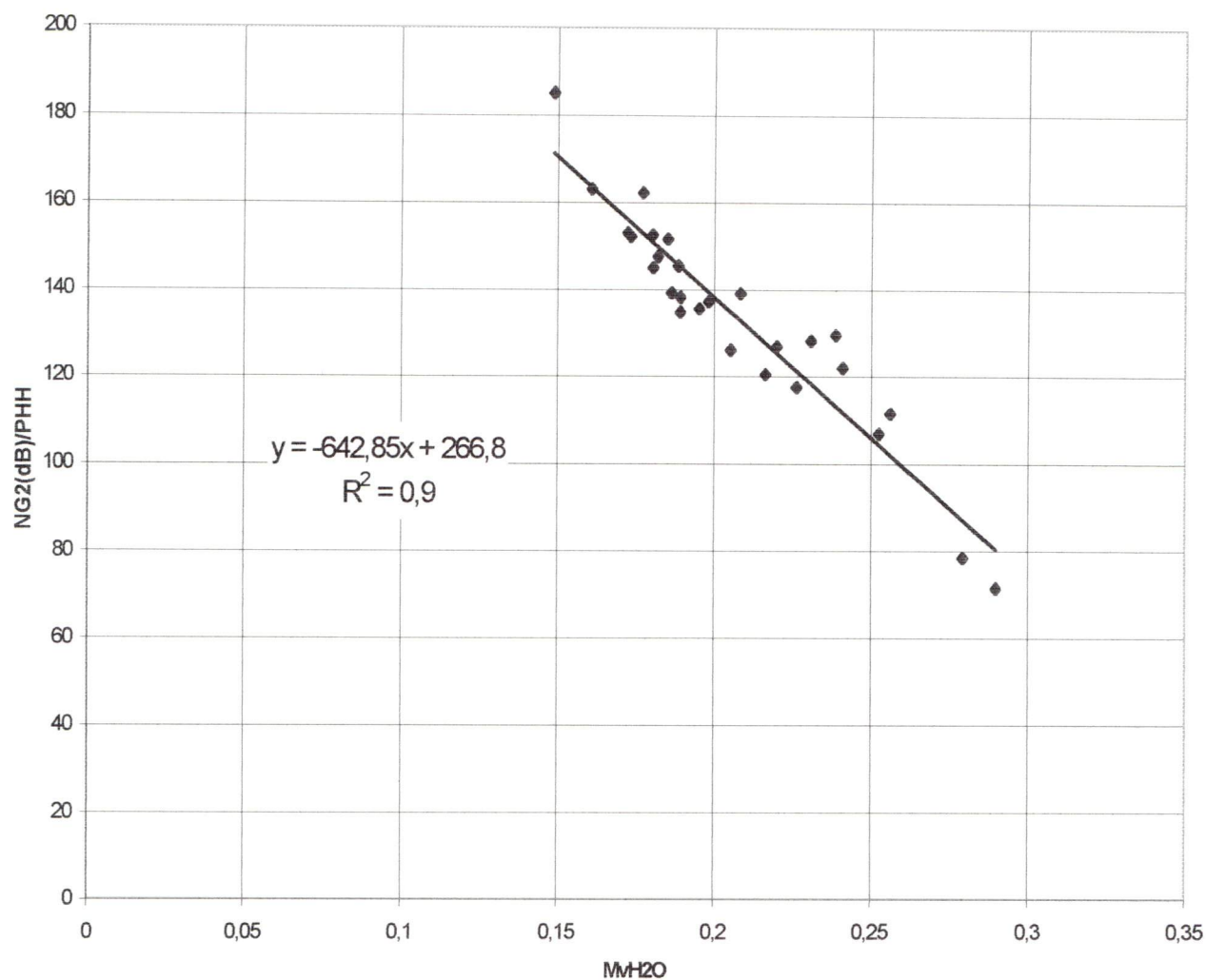


Figure 23a. Dispersion du rapport $NG^2(dB)/\rho_{HH}$ vs MvH_2O des sols nus de texture loam, suivant la classification finale (3 ième itération).

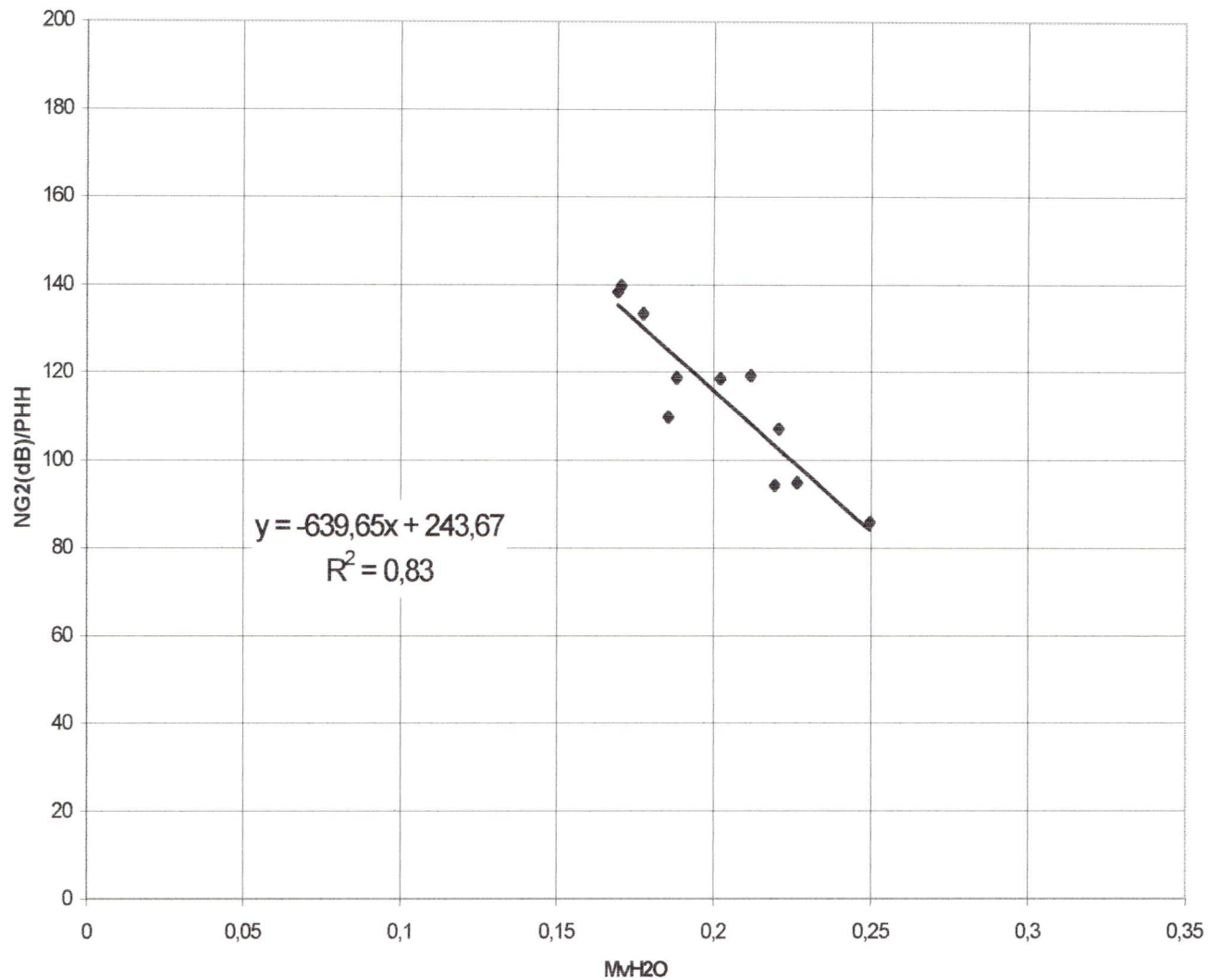


Figure 23b. Dispersion du rapport $NG^2(dB)/\rho_{HH}$ vs MvH_2O des sols nus de texture loam limoneux, suivant la classification finale (3 ième itération).

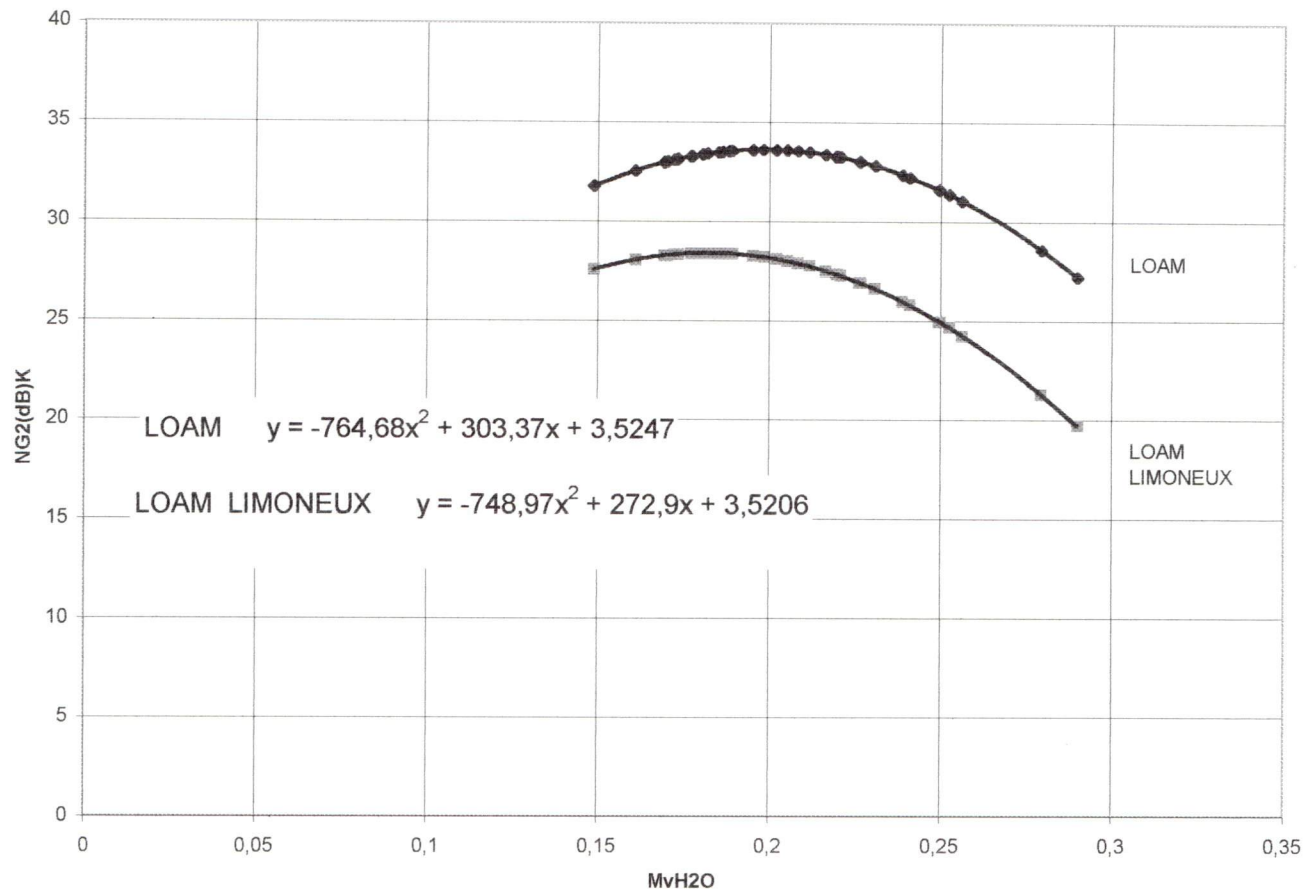


Figure 24. Graphique des courbes $NG^2(dB)K$ vs MvH_2O pour les sols nus, suivant la classification finale proposée par le modèle.

Les résultats de la dernière classification proposée des sites selon leur texture respective de sol, suivant le modèle inversé, sont illustrés au tableau 3. On remarque que les moyennes d'erreur pour chaque classe de texture de sols sont mieux réparties avec une erreur de 4,5% pour la texture loam et de 7,3% pour la texture loam limoneux. Le pourcentage de conformité entre la classification originale et la classification proposée par le modèle passe de 71% à 65,8%, soit avec 25 sites sur 38 qui demeurent conformes à la classification originale. La corrélation entre les nouvelles valeurs $NG^2(dB)K$ et les valeurs $NG^2(dB)$ aux pixels, évaluée pour chacune des deux classes de texture, est illustrée sur les figures 25a et 25b, par les droites de tendance sur les diagrammes de dispersion respectifs des deux classes de texture. La corrélation est plus forte sur les sites de texture loam (r^2 de 0,45) que ceux de texture loam limoneux (r^2 de 0,20) avec des droites de tendance positive qui demeurent conformes entre les deux classes de texture.

La force de la relation entre les valeurs $NG^2(dB)$ de l'image radar et la teneur en eau volumique MvH_2O , suivant la classification proposée par le modèle inversé, est illustrée sur les figures 26a et 26b. Les diagrammes de dispersion $NG^2(dB)$ vs MvH_2O , pour chacune des deux classes de texture, montrent une congruence dans l'attitude respective des droites de régressions avec un r^2 de 0,18 pour la texture loam, contre un r^2 de 0,19 pour la texture loam limoneux. Les corrélations sur les sites reclassifiés par le modèle sont significativement meilleures que celles de la classification originale (fig. 16a et b).

La nouvelle classification proposée par le modèle apporte une nouvelle distribution spatiale des sites de texture loam et ceux de texture loam limoneux, sur l'ensemble de l'image radar. La nouvelle classification des sites (tableau 3) a rendu possible la vérification du modèle SPM, pour lequel un nombre suffisant de sites de texture loam limoneux pouvaient maintenant être comparés avec ceux de texture loam, sur des parcelles soumises à des angles d'incidence plus favorables, soient inférieures à 60°.

Tableau 3. Classification proposée des sites de textures de sols comparée avec la classification origine, selon le modèle NG²(dB)K.

Classes : Loam = 1 ; Loam Limoneux = 2						
Nouvelle classe	Classe originale	Taux de non conformité	Site No.	Angle Incide degrés	% erreur NG2(dB)KL	% erreur NG2(dB)KLL
1	1	0	F5.11	47,67	7,51	19,75
1	1	0	F7.5	47,17	0,18	13,69
1	1	0	F7.8	47,68	1,98	12,78
1	1	0	F3.9	57,86	2,05	12,79
1	1	0	F5.12	47,83	5,73	19,64
1	1	0	F4.5	52,99	1,08	15,87
1	1	0	F3.10	57,94	3,99	11,57
1	1	0	F7.9	47,84	1,56	13,73
1	1	0	F7.2	46,67	2,56	17,42
1	1	0	F7.1	46,50	5,60	10,58
1	1	0	F5.10	47,49	0,13	15,36
1	1	0	F7.10	48,01	5,09	11,21
1	1	0	F7.7	47,32	7,69	9,02
1	2	1	F2.5	66,66	4,20	12,40
1	1	0	F7.4	47,00	1,52	14,87
1	1	0	F7.6	47,34	6,96	10,87
1	1	0	F6.4	48,03	4,48	20,63
1	1	0	F3.8	57,77	5,99	12,63
1	2	1	F7.3	46,84	1,23	18,90
1	1	0	F3.11	58,02	3,13	15,93
1	1	0	F6.5	47,93	7,70	25,16
1	1	0	F2.11	68,07	12,58	29,85
1	1	0	F6.3	48,11	8,37	26,69
1	2	1	F2.16	67,58	2,25	23,14
1	2	1	F3.12	58,10	8,50	28,51
1	2	1	F2.7	67,12	10,99	17,34
1	2	1	F2.8	67,36	12,48	18,57
2	1	1	F4.3	53,18	14,12	2,20
2	1	1	F3.14	58,56	12,52	3,64
2	1	1	F3.13	58,72	14,53	2,38
2	2	0	F2.10	67,83	34,41	13,88
2	1	1	F4.2	53,27	22,83	3,86
2	1	1	F4.1	53,36	15,48	3,49
2	1	1	F3.15	58,47	9,64	9,19
2	2	0	F2.6	66,89	33,33	9,53
2	1	1	F4.4	53,09	16,62	4,34
2	2	0	F2.17	67,36	27,86	4,21
2	2	0	F2.9	67,60	23,96	2,09
Sites Total		Sites bons			Moy %erreur	Moy % erreur
38		25			KL	KLL
% conforme		65,79			4,48	7,28

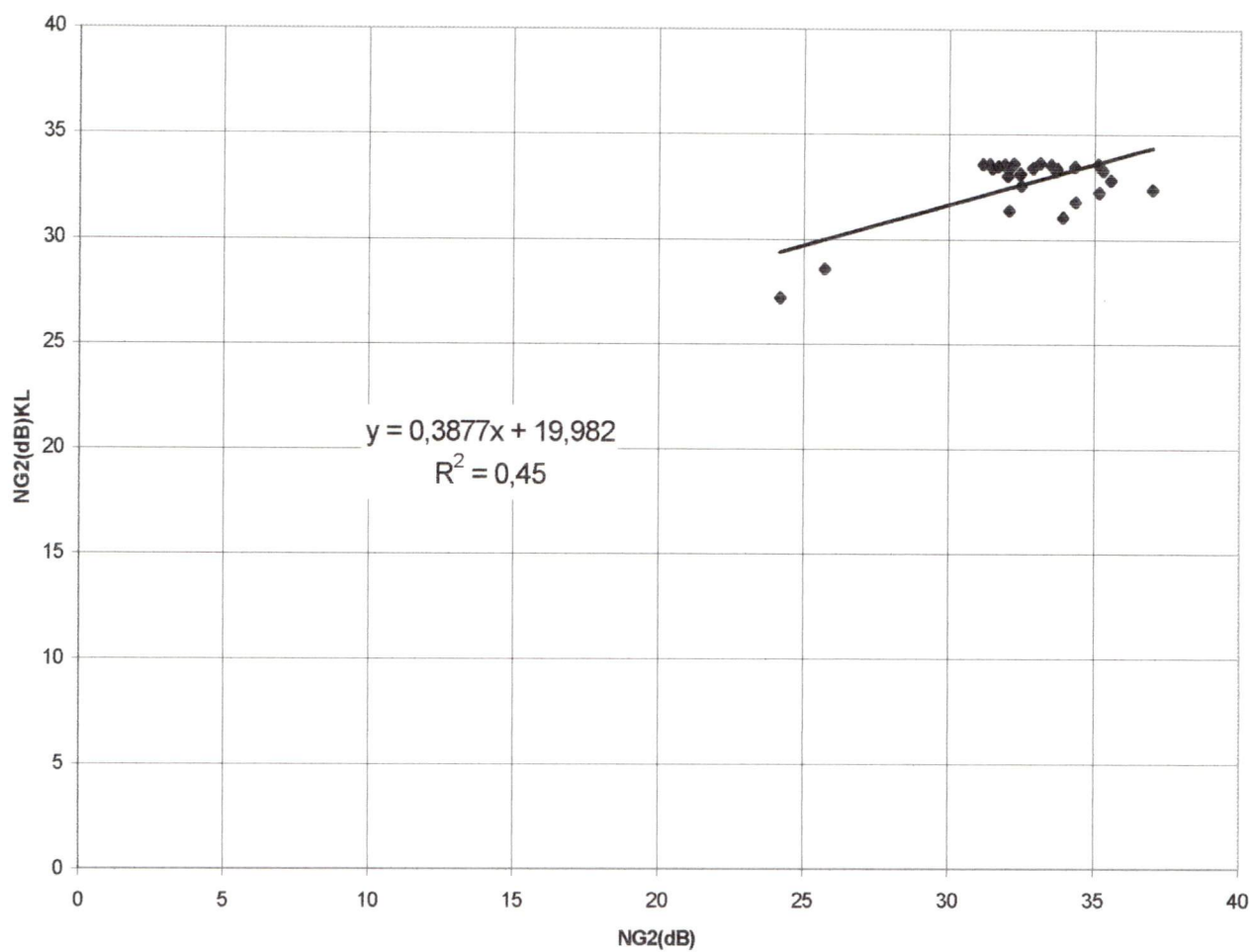


Figure 25a. Dispersion des valeurs $NG^2(dB)K$ modélisées vs les valeurs $NG^2(dB)$ de l'image radar, pour les sites de texture loam.

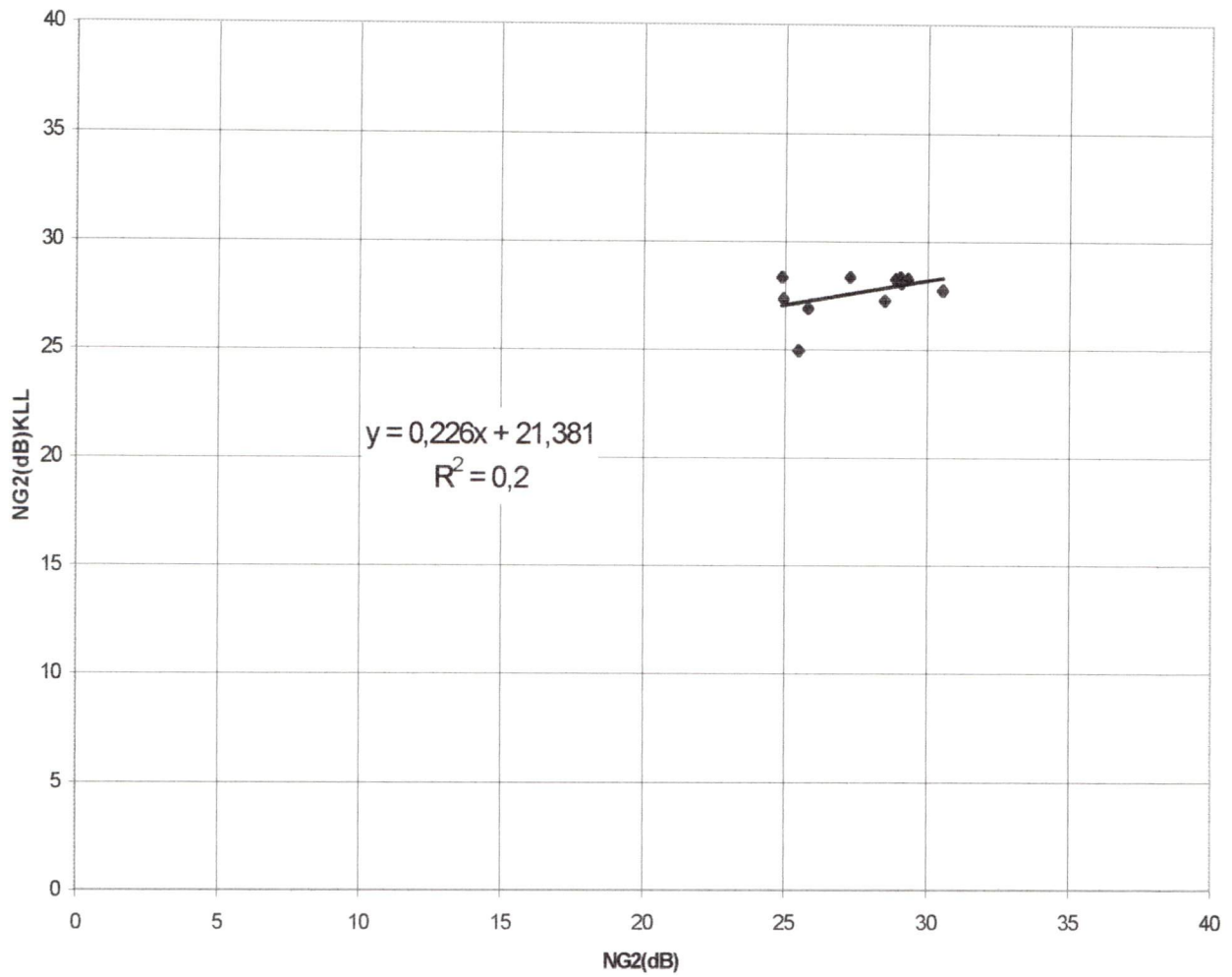


Figure 25b. Dispersion des valeurs $NG^2(dB)K$ modélisées vs les valeurs $NG^2(dB)$ de l'image radar, pour les sites de texture loam limoneux.

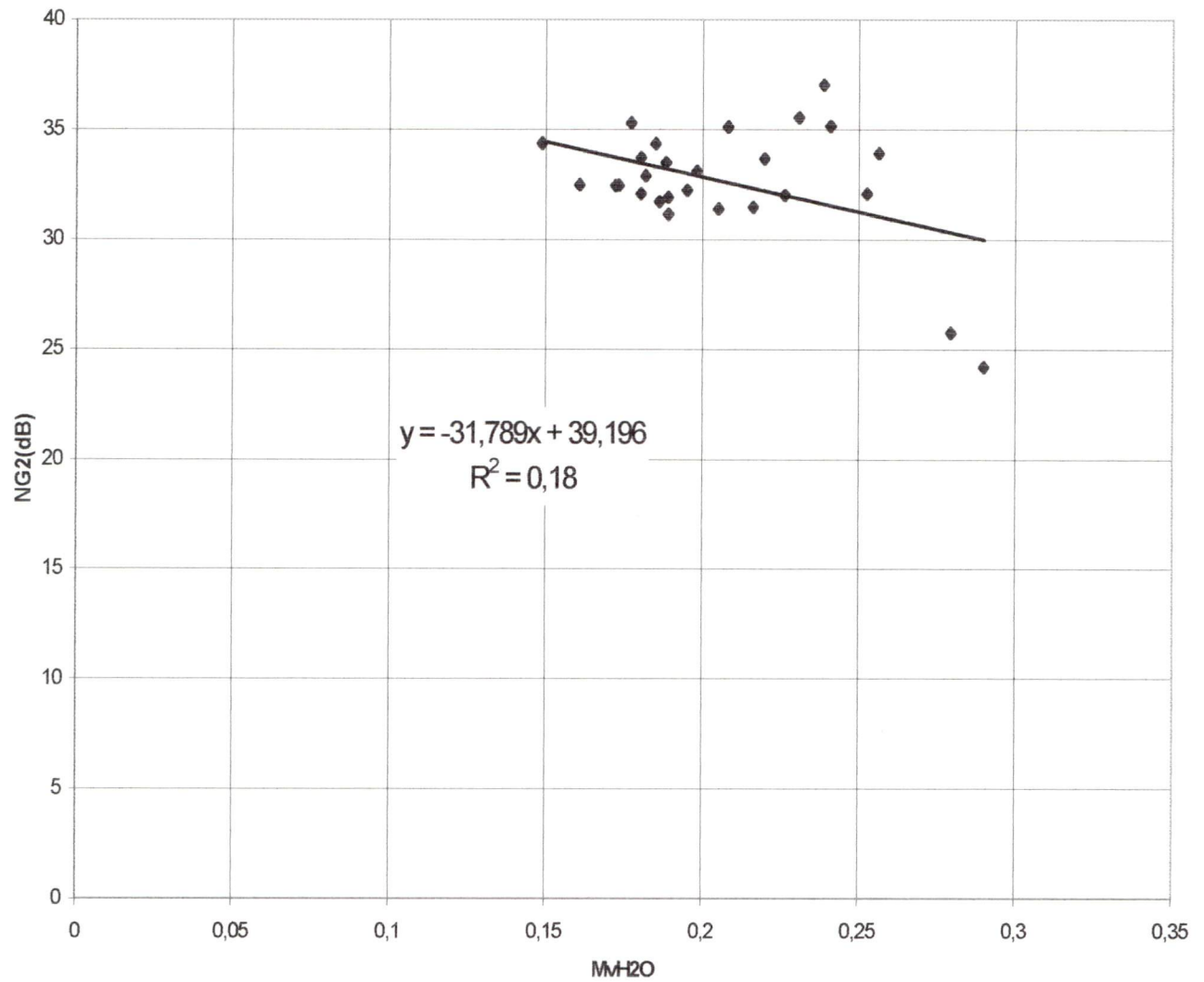


Figure 26a. Dispersion des valeurs $NG^2(dB)$ vs MvH_2O sur les sites de texture loam suivant la nouvelle classification proposée.

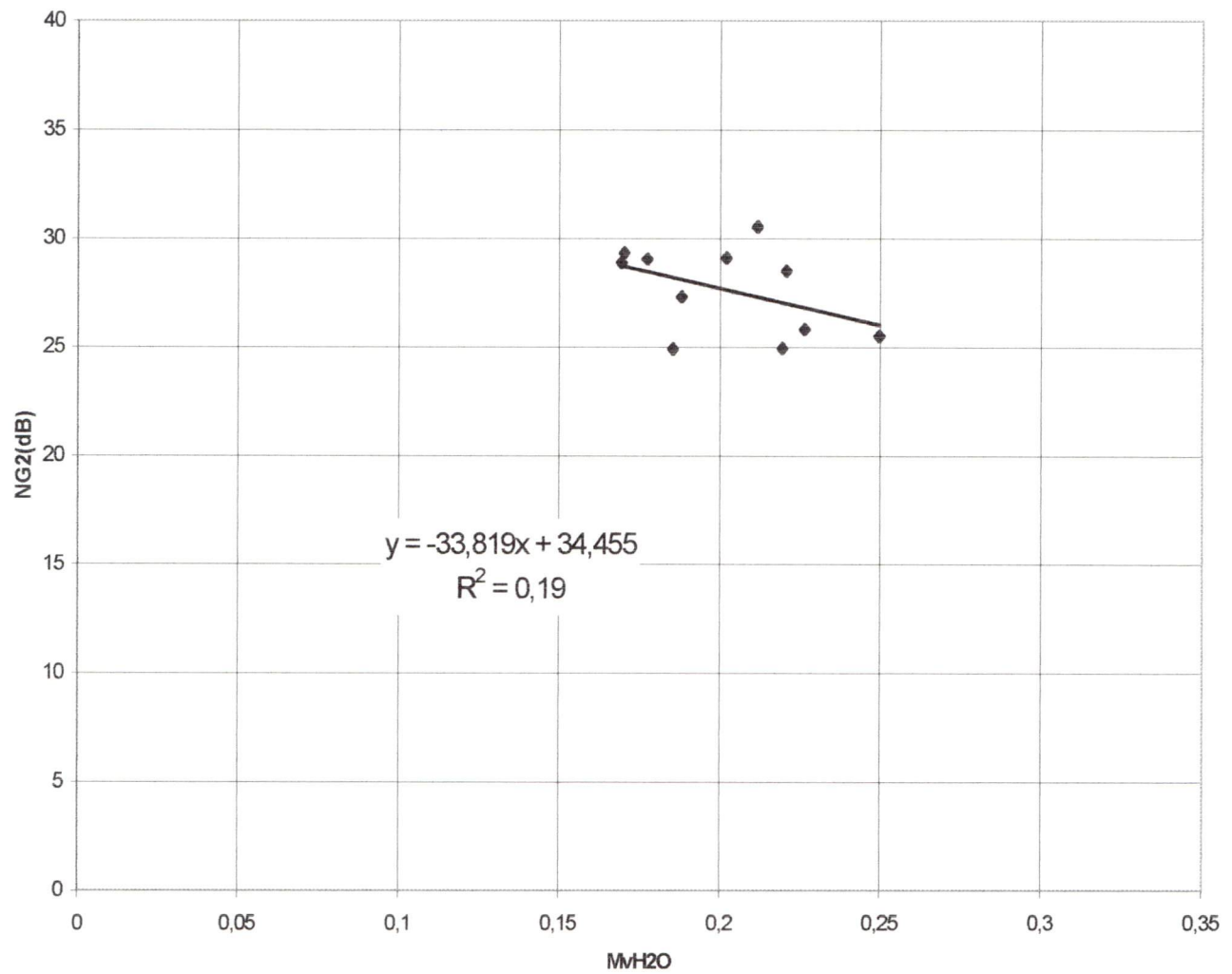


Figure 26b. Dispersion des valeurs $NG^2(dB)$ vs MvH_2O sur les sites de texture loam limoneux suivant la nouvelle classification proposée.

Cette nouvelle distribution spatiale entre les sites de texture loam et ceux de texture loam limoneux est illustrée aux figures 27a et 27b, sur les nouveaux diagrammes de dispersion σ°_{HH} vs MvH_2O . La distribution des sites de texture loam limoneux aux valeurs σ°_{HH} supérieures à 0,5 dB est plus abondante à partir de la nouvelle classification (fig. 27b). L'examen des diagrammes de dispersion σ°_{HH} suivant l'angle d'incidence (fig. 28a et b) montre la nouvelle distribution spatiale des sites reclassifiés suivant leur classe respective de texture de sol. Cette distribution est plus favorable à un angle d'incidence autour de 52°, où la comparaison entre les deux classes de texture de sols est rendue possible aux valeurs σ°_{HH} avoisinant 1dB. Le comportement du signal rétrodiffusé σ°_{HH} vs MvH_2O , suivant les classes de texture de sols à un angle d'incidence de 52°, est illustré aux figures 29a et 29b. L'examen des droites de régression montre une différence entre les deux classes de texture, où les sites de texture loam affichent des valeurs σ°_{HH} plus élevées que ceux de texture loam limoneux.

La persistance vers des valeurs plus élevées du signal rétrodiffusé sur les sols de texture loam comparativement aux sols de texture loam limoneux, aux mêmes conditions d'humidité MvH_2O inférieures à 30%, est une caractéristique qui demeure conforme suivant l'analyse quantitative d'un modèle physique théorique (SPM) et d'un modèle empirique expérimental ($NG^2(dB)K$).

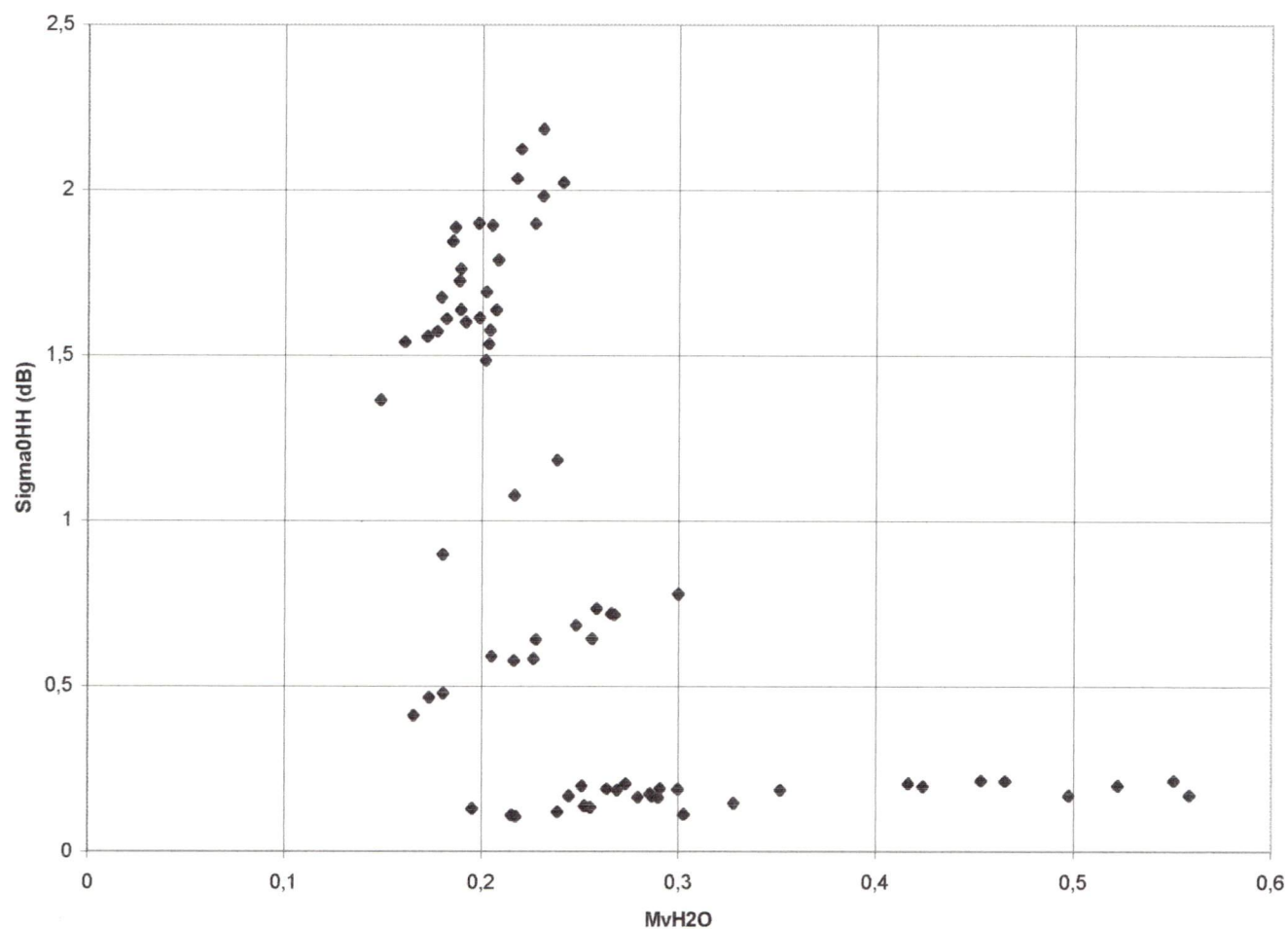


Figure 27a. Dispersion SPM des valeurs σ_{HH}^0 vs MvH_2O sur les sites de texture loam, suivant la nouvelle classification proposée.

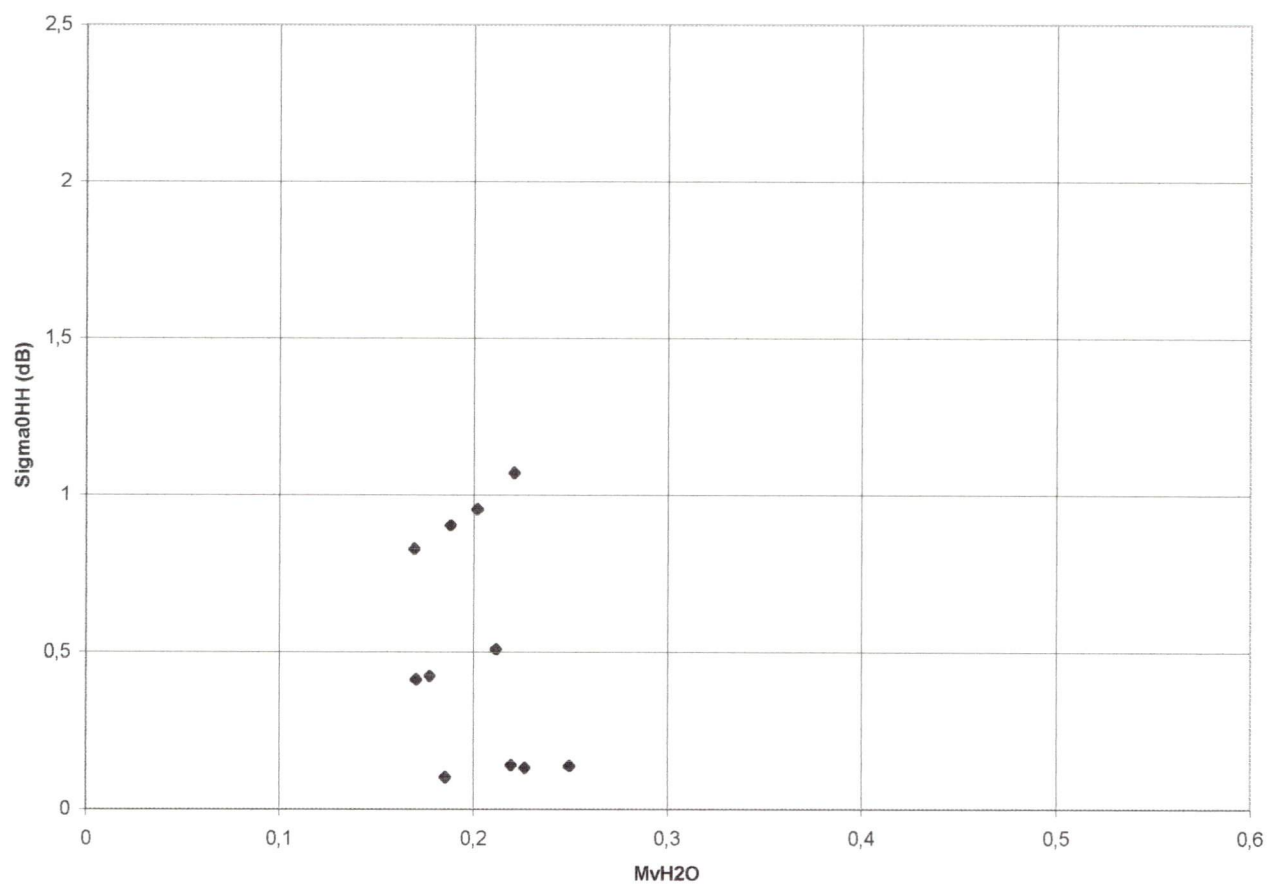


Figure 27b. Dispersion SPM des valeurs σ_{HH}^0 vs MvH_2O sur les sites de texture loam limoneux, suivant la nouvelle classification proposée.

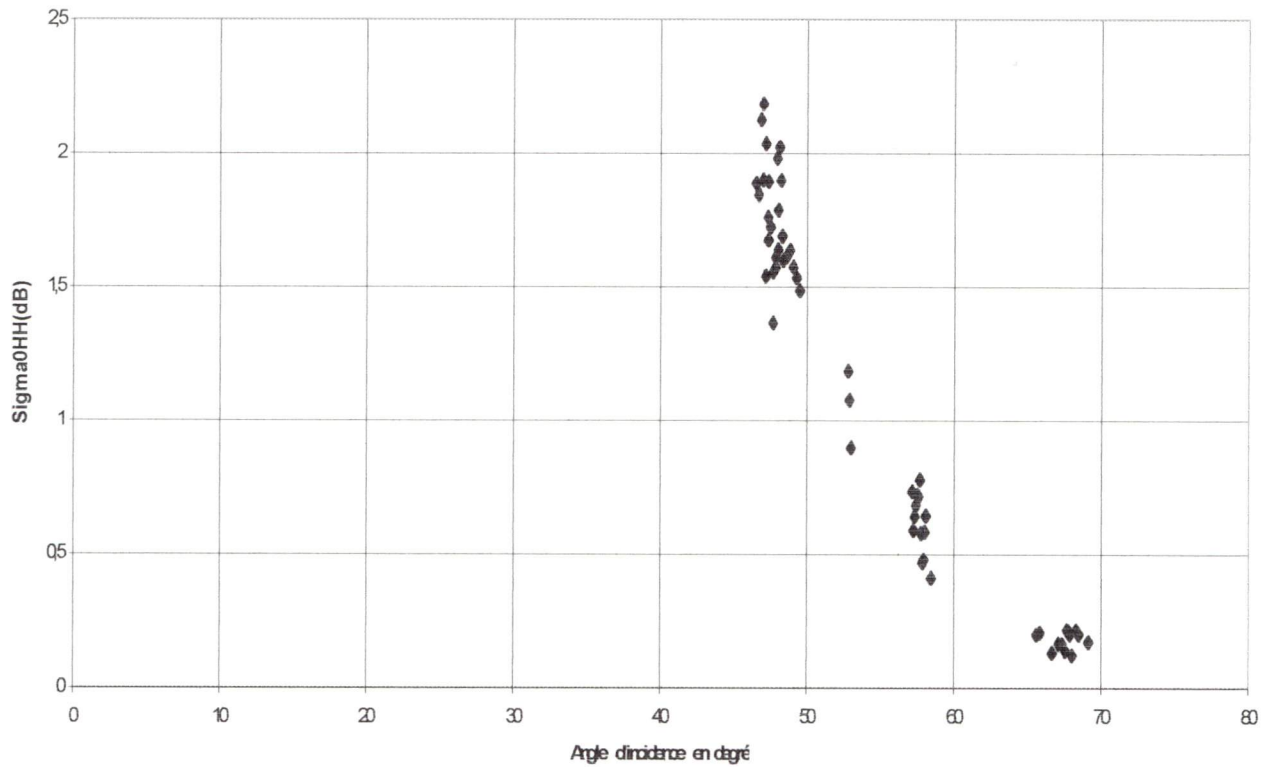


Figure 28a. Dispersion SPM des valeurs σ°_{HH} en fonction de l'angle d'incidence sur les sites de texture loam, suivant la nouvelle classification proposée.

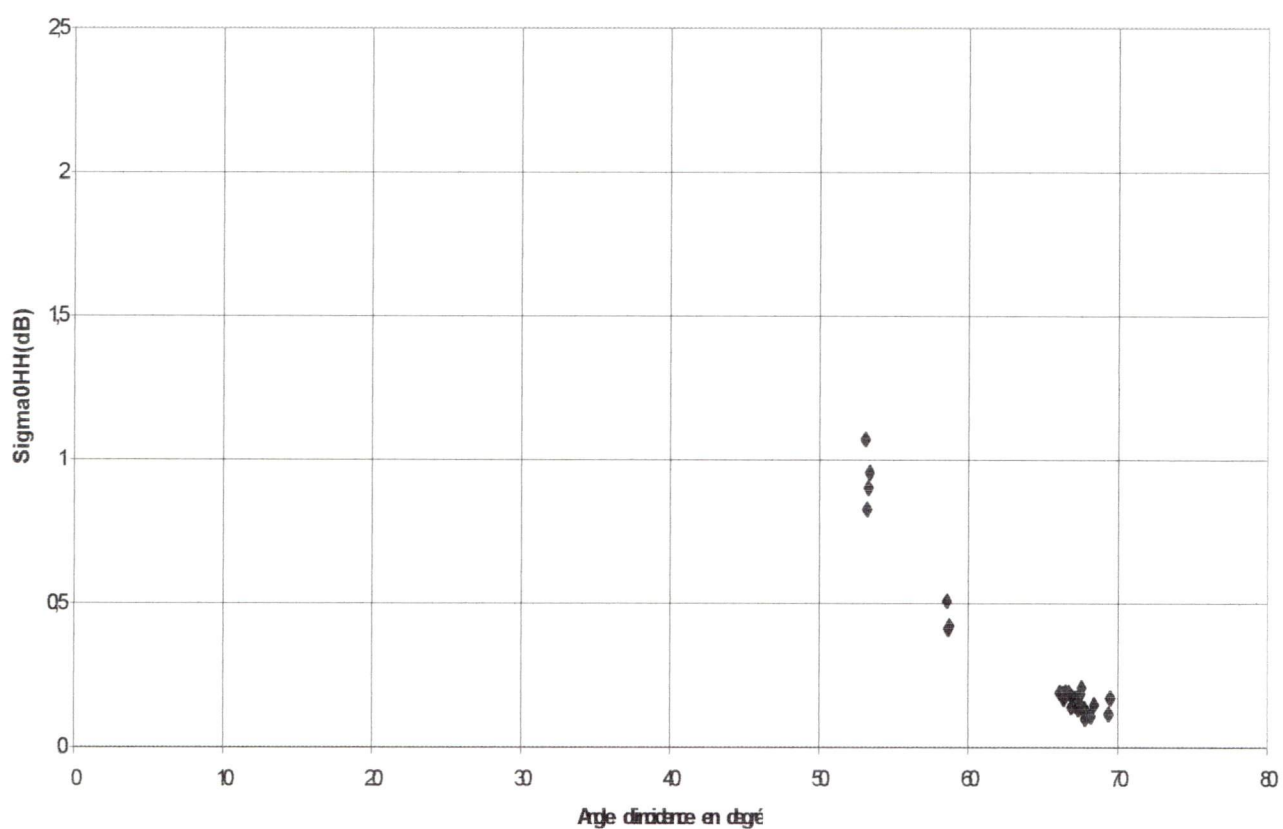


Figure 28b. Dispersion SPM des valeurs σ°_{HH} en fonction de l'angle d'incidence sur les sites de texture loam limoneux, suivant la nouvelle classification proposée.

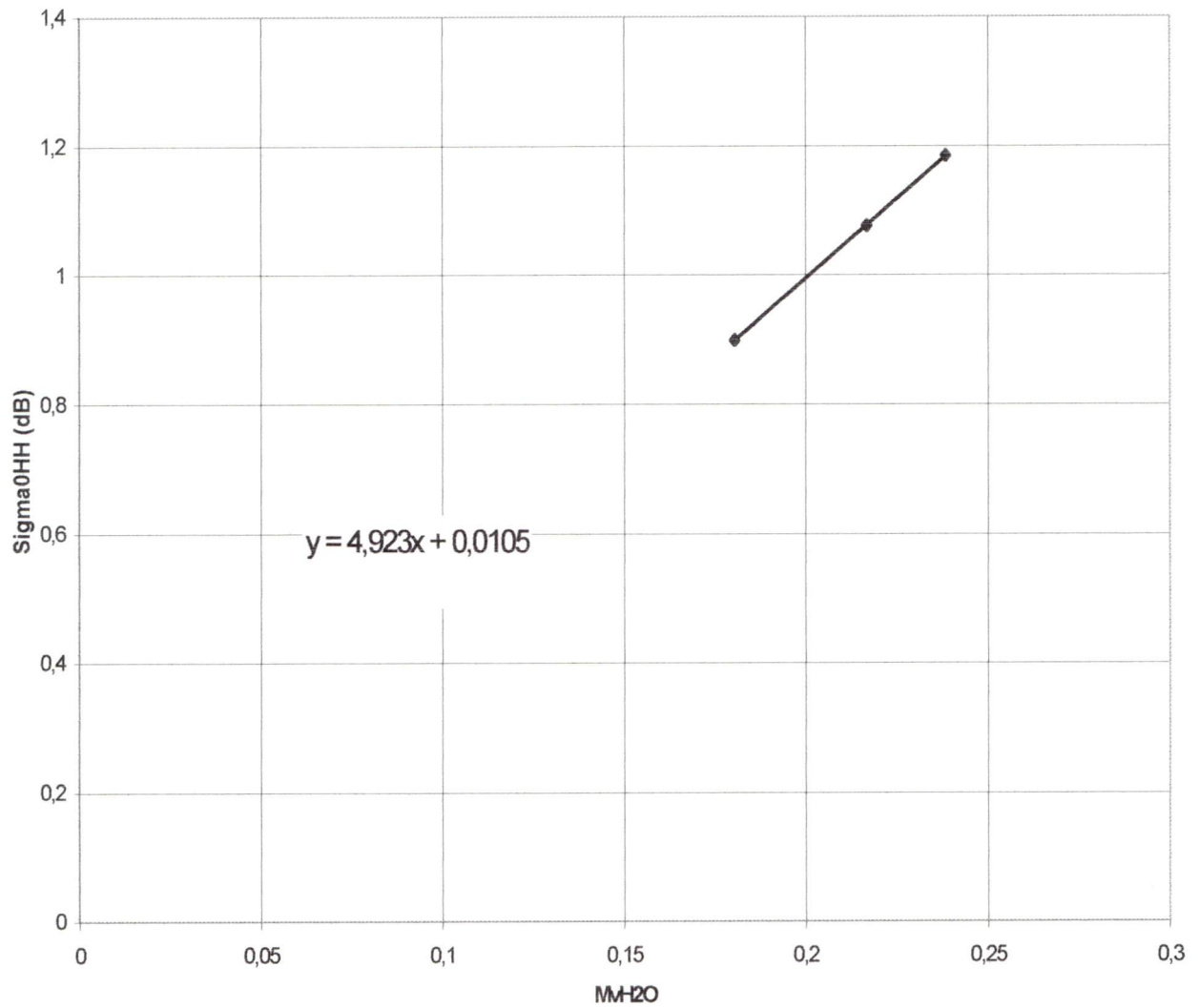


Figure 29a. Dispersion SPM des valeurs σ_{HH}^0 vs MvH_2O selon un angle d'incidence de 53° sur les sites de texture loam, suivant la nouvelle classification proposée.

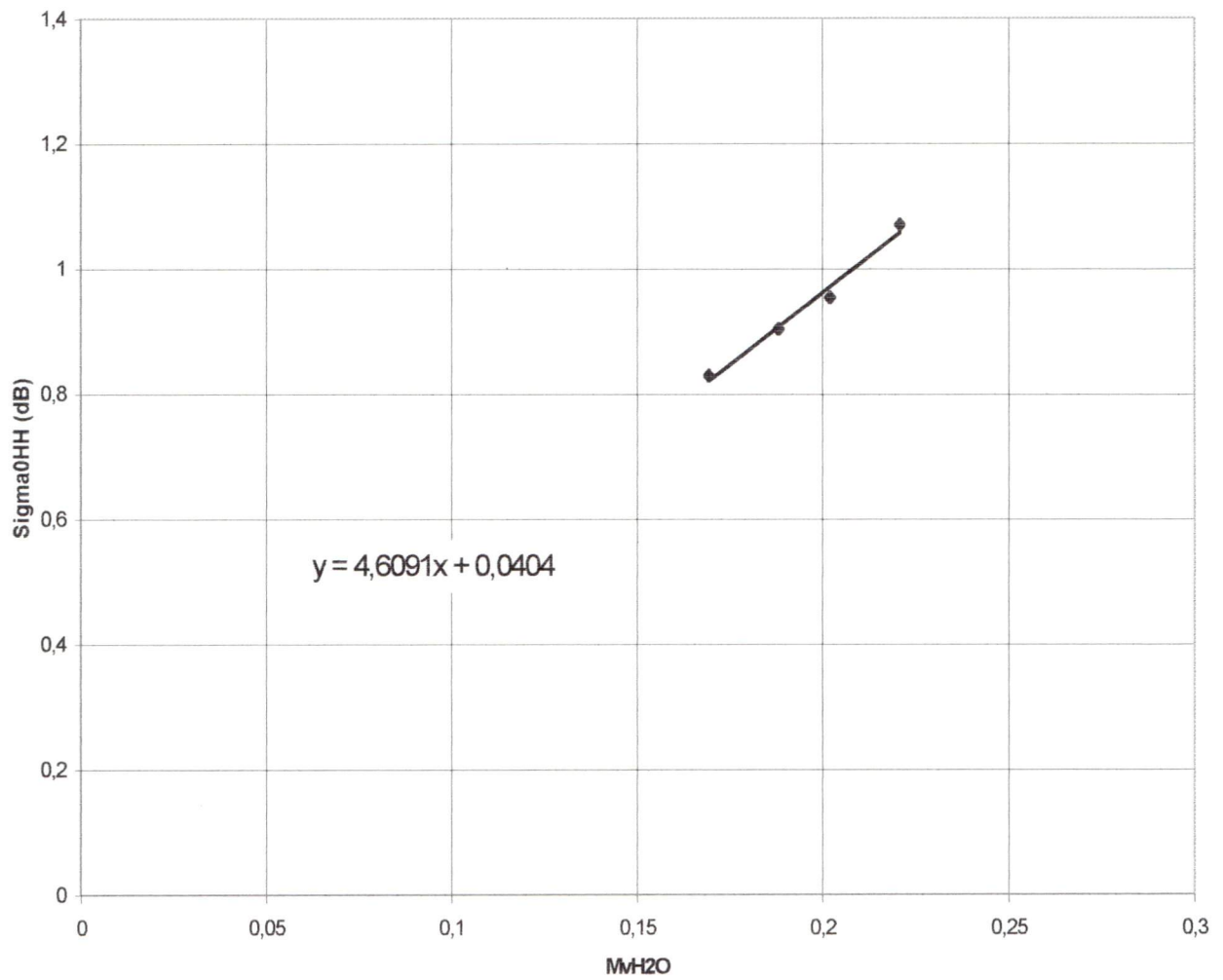


Figure 29b. Dispersion SPM des valeurs σ_{HH}° vs MvH_2O selon un angle d'incidence de 53° sur les sites de texture loam limoneux, suivant la nouvelle classification proposée.

4. Interprétation des résultats et discussion

Sur la base des résultats obtenus, une distinction est évidente entre deux classes limitrophes de texture de sol par l'analyse du signal rétrodiffusé radar en bande C. En général, les sols de texture loam ont une tendance générale vers des valeurs plus hautes du signal rétrodiffusé σ°_{HH} que les sols de texture limoneux aux mêmes valeurs MvH_2O . Cette distinction est plus évidente dans des conditions d'humidité moyenne entre 15% et 30%.

Ceci est en accord avec les résultats de travaux antérieurs (Tian and Gwyn, 1994), lesquels ont démontrés la dépendance du signal rétrodiffusé radar sur les textures de sols. Les auteurs ont calculé les constantes diélectriques de 23 textures de sols en fonction de leur teneur en eau volumique, à partir des expressions polynomiales développées par Hallikainen *et al.* Le modèle SPM fut utilisé afin d'évaluer la sensibilité des textures de sols sur le coefficient de rétrodiffusion en polarisation HH aux fréquences comprises entre 1,4 et 18 GHz, aux angles d'incidences entre 20° et 75°, des teneurs en eau volumique entre 5% et 45%, et deux rugosités. Parmi les conclusions majeures de ces travaux, on rapporte que :

1. La différence du σ°_{HH} pour les textures décroît avec l'accroissement de la teneur en eau volumique pour différentes fréquences. La différence la plus grande du σ°_{HH} entre les textures survient aux valeurs MvH_2O entre 10% et 15%.
2. Les différences maximum du σ°_{HH} pour les sols sableux et argileux décroît légèrement avec un accroissement de l'angle d'incidence. La différence du σ°_{HH} pour les textures de sols est presque indépendante de l'angle d'incidence entre 20° et 45°.
3. Les différences du σ°_{HH} pour différentes textures sont indépendantes de la rugosité pour toutes les fréquences, les angles d'incidence et l'humidité des sols.

4. La sensibilité du σ_{HH}^0 pour les différentes textures en fonction de la fréquence est variable. La différence du σ_{HH}^0 est plus grande aux basses fréquences.
5. La séparation des textures de sols est meilleure à 1,4 GHz que pour les autres fréquences utilisées.
6. La réponse de la texture d'un sol vis-à-vis le σ_{HH}^0 est différente pour toutes les fréquences, les angles d'incidence et les valeurs MvH₂O. Le σ_{HH}^0 d'un sable est le plus élevé et celui d'une argile, le plus faible à humidité comparable.

L'identification des classes de texture de sols nus en bande C, aux conditions d'humidité volumique non saturées, est possible à partir de l'analyse du coefficient de rétrodiffusion d'une image radar sur des parcelles agricoles. La cause fondamentale de la réponse radar sur les cinq premiers centimètres de sols nus est la teneur en eau de rétention. Le volume d'eau de rétention, lié à la surface spécifique des constituants texturaux, est plus abondant dans les sédiments fins que dans les sédiments grossiers.

L'eau pelliculaire doit occuper une surface spécifique plus importante dans un sol plus argileux avant d'atteindre la mobilité hydrique de l'eau libre. Pour un sol plus sableux, la surface spécifique est moindre et favorise ainsi une plus forte distribution volumique d'eau libre polarisée sous l'influence de l'onde radar. Le comportement diélectrique d'un sol de texture plus argileuse diffère de celui d'un sol de texture plus sableuse pour un même taux d'humidité volumique (MvH₂O) inférieur à 30%. Pour un sol de texture plus sableuse, la valeur transitoire de la teneur en eau libre est déjà atteinte à ce niveau d'humidité avec des valeurs diélectriques (ϵ_r) plus élevées.

Ce phénomène est illustré par le comportement des courbes $NG^2(\text{dB})K$ vs MvH₂O calculées suivant le modèle inversé pour chaque classe de texture (fig. 25). Les courbes illustrent ce comportement du signal rétrodiffusé sur un sol de texture loam,

en montrant des valeurs $NG^2(dB)K$ maximales autour de la valeur MvH_2O de 20%. Pour un sol de texture loam limoneux, ce comportement diffère avec une valeur du signal rétrodiffusé maximale autour d'une valeur MvH_2O inférieure (18%), pour décroître lorsque la valeur MvH_2O atteint 30%. Cette différence de comportement des courbes montre qu'une plus grande quantité d'eau libre existe dans un sol plus sableux. Les sols de texture loam limoneuxaturent plus vite que les sols de texture loam.

Les courbes $NG^2(dB)K$ vs MvH_2O de la figure 25 montrent une différence entre les textures qui augmente aux valeurs MvH_2O croissantes. La séparation des textures est meilleure aux conditions MvH_2O entre 18% et 20%. Aux valeurs MvH_2O supérieures, les valeurs $NG^2(dB)K$ subissent une atténuation caractéristique du signal selon les deux classes de texture; la courbe de texture loam limoneux montre une atténuation plus forte que celle de texture loam. L'absorption du signal rétrodiffusé dans un sol étant liée à la conductivité du milieu diffuseur, les sols plus argileux se caractériseraient ainsi par une plus grande absorption du signal rétrodiffusé. Ceci serait dû aux échanges ioniques de la fraction argileuse qui peuvent favoriser les pertes diélectriques par une plus forte conductivité (Hallikainen et al., 1985). Une plus grande quantité d'argile dans un sol favorisera donc les pertes par absorption, comme le suggèrent les courbes des valeurs $NG^2(dB)K$ vs MvH_2O pour la texture loam limoneux (fig. 25).

Dans la présente étude, l'analyse quantitative du coefficient de rétrodiffusion avec le modèle SPM montre que la différence entre les textures de sols est évidente aux angles d'incidence moyens (55°), et devrait, par voie de conséquence, s'améliorer aux angles d'incidence plus faibles. En effet, les sites de texture loam montrent une sensibilité plus forte aux angles d'incidence faibles (fig. 29a). Cette sensibilité se caractérise par la pente des droites de régression de chaque regroupement suivant la plage d'angle d'incidence. La pente est plus forte aux angles d'incidence faibles et diminue à mesure qu'augmente l'angle d'incidence, pour finalement se confondre

avec le bruit du signal radar aux angles d'incidence supérieurs à 60° . L'influence des effets géométriques est autant manifeste à la figure 10, qui montre les quatre classes de regroupement des valeurs σ_{HH}^0 en fonction de l'angle d'incidence. Les regroupements exhibent des formes ellipsoïdales plus étirées aux angles d'incidence entre 45° et 57° , contrairement à la forme presque circulaire du quatrième regroupement aux angles d'incidence forts (60° à 70°). L'emploi du modèle SPM est réalisable pour l'identification des classes de texture de sols, mais demeure sensible aux effets géométriques combinés de la rugosité et de l'angle d'incidence, décrits auparavant.

En normalisant l'influence de la rugosité de surface par le rapport $NG^2(dB)/\rho_{HH}$ à partir des données radar et de terrain, les effets des textures de sols sont ainsi favorisées vis-à-vis les valeurs aux pixels du signal rétrodiffusé de l'image radar. Les textures de sols ont exprimées par les valeurs de constante diélectrique du modèle d'Hallikainen, intégrées dans le facteur de réflexion ρ_{HH} . Lorsqu'on compare les valeurs $NG^2(dB)K$ proposées par le modèle avec les valeurs $NG^2(dB)$ de l'image radar, la tendance respective de chaque droite de régression montre une congruence dans l'attitude des pentes pour les deux classes de texture de sols (Fig. 26a et b). Les coefficients de détermination r^2 , respectifs aux deux classes de texture, montrent de meilleures corrélations sur les sites reclassifiés par le nouveau modèle avec la valeur $NG^2(dB)$ de l'image radar. Cela peut s'expliquer par la distribution spatiale de l'échantillonnage des pixels de l'image radar, suivant la taille de fenêtre.

Les valeurs $NG^2(dB)$ aux pixels de l'image radar représentent une taille de fenêtre de 11×11 pixels pour une résolution au sol de $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$. Ceci représente une surface au sol de $44 \text{ m} \times 44 \text{ m}$, soit 1936 m^2 , contre 78 m^2 pour la superficie d'échantillonnage des sites au sol. Ainsi, les valeurs du coefficient de réflexion des puissances ρ_{HH} , calculées à l'aide du modèle d'Hallikainen apparaissent comme des valeurs ponctuelles comparativement aux valeurs $NG^2(dB)$ de l'image radar, avec un facteur

de 1 pour 25, parce que les valeurs $NG^2(dB)K$ calculées par le modèle inversé représentent une plus grande superficie. Il est donc plus probable que la classification proposée par le modèle $NG^2(dB)K$ représente les classes effectives de texture de sols sur les parcelles de terrain.

Les analyses du comportement général du signal rétrodiffusé de l'image radar montrent une atténuation progressive du signal aux valeurs MvH_2O supérieures à 20% (fig. 25). Le calcul du facteur ρ_{HH} donne des courbes calculées qui augmentent de façon linéaire en fonction des valeurs croissantes MvH_2O non saturées, pour atteindre un seuil de transition aux valeurs MvH_2O autour de 30% (fig. 8a et 8b). Dans ce cas, les courbes calculées du signal rétrodiffusé, suivant le nouveau modèle proposé $NG^2(dB)K$, furent établies à partir de critères hydriques caractéristiques sur des sols nus aux valeurs MvH_2O inférieures à 30%. Le comportement des courbes est donc restreint à ces plages de valeurs d'humidité quelle que soit la valeur de l'angle d'incidence (fig. 20, 22 et 25).

Selon Dobson et al.,(1985), le calcul du coefficient de réflexion de puissance des valeurs diélectriques mesurées en laboratoire indiquerait que le coefficient de rétrodiffusion devrait être linéairement dépendant du taux d'humidité aux valeurs non saturées. À saturation, le coefficient de rétrodiffusion devrait se stabiliser autour d'une valeur maximum, étant devenu moins sensible à une augmentation en humidité, comme on le voit à la figure 24. Sur la base de ces travaux, les sols sursaturés et inondés se comportent comme des surfaces spéculaires en diminuant l'intensité du coefficient de rétrodiffusion.

L'examen des diagrammes de dispersion $NG^2(dB)$ vs MvH_2O , suivant la nouvelle classification (fig. 27a et b), montre que la tendance des droites de régression respectives à chaque classe de texture est conforme à une atténuation du signal $NG^2(dB)$ aux valeurs MvH_2O croissantes, quelle que soit la valeur de l'angle

d'incidence. Les coefficients r^2 respectifs aux deux classes de texture témoignent de la force de relation qui existe entre les valeurs $NG^2(dB)$ de l'image radar en fonction des valeurs MvH_2O des sites reclassifiés par le nouveau modèle proposé. En effet, le nouveau modèle proposé ($NG^2(dB)K$) a permis de reclassifier les sites d'échantillonnage, sur les parcelles de terrain en condition de sol nu, suivant leur classe respective de texture de sols, quel que soit l'angle d'incidence et selon des conditions hydriques non saturées, c'est-à-dire aux valeurs MvH_2O inférieures à 30%.

5. Conclusion

L'analyse de deux modèles du signal rétrodiffusé, l'un physique théorique et l'autre empirique expérimental, sur des parcelles de sols nus, a montré que la texture d'un sol et le signal rétrodiffusé sont reliés et que ce lien est plus évident dans des conditions d'humidité moyenne (20%). Ainsi, il en ressort que l'identification des classes de texture de sols nus par l'analyse du coefficient de rétrodiffusion radar est possible aux conditions hydriques pertinentes à la rétention spécifique des composantes texturales des sols, en évitant les conditions d'humidité vers les niveaux de saturation. L'analyse du modèle SPM a démontré l'influence des effets géométriques de la rugosité de surface sur la réponse radar liée aux effets des textures de sols. Cependant, ces effets texturaux se manifestent aux angles d'incidence faibles et aux valeurs MvH_2O inférieures à 30%.

L'emploi du modèle SPM pour une application thématique en agriculture est envisageable, selon les résultats obtenus. Pour fin de recommandation concernant une future application cartographique sur les mêmes parcelles de terrain de Woodstock, N-B., l'acquisition de l'image radar devrait suivre un azimuth nord-sud avec un angle d'incidence au sol de 20° à 45° , couvrant ainsi une distribution plus uniforme des textures de sols sur l'ensemble de l'image radar. La période temporelle d'acquisition devrait correspondre à des conditions hydriques non saturées sur des parcelles de sols nus, ou partiellement couvertes.

Cette étude a démontré le lien existant entre la texture d'un sol et le signal rétrodiffusé radar, en validant le modèle d'Hallikainen à partir des données de terrain intégrées dans un modèle inversé $NG^2(dB)K$, avec les valeurs NG^2 correspondantes d'une image radar brute. Dans ce cas, la validation du modèle d'Hallikainen sur le terrain devient cruciale pour l'identification des classes de texture de sols, par l'expression de la constante diélectrique calculée sur chaque site. L'effet de la texture d'un sol est

plus manifeste dans l'expression du facteur de réflexion de Fresnel, comme le témoigne la corrélation entre le rapport normalisé $NG^2(dB)/\rho_{HH}$ entre les valeurs aux pixels d'une image radar brute et les valeurs de constante diélectrique calculées pour chaque site, en fonction de l'humidité volumique des sols.

À partir des équations polynomiales des courbes modélisées du signal radar relatif $NG^2(dB)$ en fonction des valeurs MvH_2O , on peut évaluer la contribution des textures de sols nus sur la rétention spécifique de l'humidité volumique des parcelles de terrain agricoles aux pixels de l'image radar. L'intérêt de la cartographie thématique des sols réside dans les suivis répétitifs et réguliers des conditions hydriques sur les parcelles cultivées, dans le but d'évaluer la contribution des classes de texture de sols sur la rétention hydrique des parcelles cultivées et de prévoir ainsi les conditions favorables aux cultures. La sensibilité du signal rétrodiffusé en bande C est suffisante pour distinguer les classes limitrophes de texture de sols, en condition de sol nu avec des teneurs en eau volumiques non saturées, c'est-à-dire inférieures à 30%.

6. Références

Arès, A. et J. Marcoux. 1970. *Electricité*. Édition Lydec, Montréal, 426 p.

Arès, A. et J. Marcoux. 1974. *Optique et structure de la matière*. Édition Lydec, Montréal, 307 p.

Canada Centre for Remote Sensing. 1994. *Airborne C/X-SAR*. Minister of Supply and Services Canada, Ottawa, 11 p.

Canada Soil Survey Committee. 1978. *The Canadian System of Soil Classification*. Research Branch, Canada Department of Agriculture, Publication 1644 : p 115.

Dobson, M. C., F.T. Ulaby, M. T. Hallikainen and M. A. El-Rayes. 1985. Microwave dielectric behavior on wet soil - Part II: Dielectric mixing models. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, Vol. Ge-23, January, No.1: p 35-46.

Dobson, M. C. and F. T. Ulaby. 1986. Active microwave soil moisture research. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, Vol. Ge-24, November, no.6 : p 23-26.

Fahmy, S. H., H. W. Rees and J. K. MacMillan. 1986. *Soils of New Brunswick: a first approximation*. New Brunswick Department of Agriculture, 105 p.

- Hallikainen, M. T., F. T. Ulaby, M. C. Dobson and M. A. El-Rayes. 1985. Microwave dielectric behavior on wet soil-Part I: Empirical models and experimental observations. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, Vol. Ge-23, January, No.1: p 15-34.
- Johnson, F., B. Brisco and R. J. Brown. 1993. Evaluation of limits to the performance of the surface roughness meter. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol. 19, No.2, April, p 140-145.
- Landry B. et M. Mercier. 1984. *Notions de géologie*. Modulo éditeur, Mont-Royal, Québec, 437 p.
- Schmugge, T. J. 1980. Effect of texture on microwave emission from soils. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, Vol. GE-18, No. 4, October: p 353-361.
- Tian, G. and Q. H. J. Gwyn. 1994. Sensitivity of radar backscatter to soil texture: an empirical and physical evaluation. *Communication personnelle*. Cartel, Université de Sherbrooke, Sherbrooke. Soumis au IEEE.
- Topp, G. C. 1987. The application of time-domain reflectometry (TDR) to soil water content measurement. *Int. conf. on measurement of soil and plant water status*, vol. 1, 6-10 July, Logan, Utah: p 85-93.
- Ulaby, F. T., R. K. Moore and A. K. Fung. 1982. *Microwave remote sensing: volume II. Fundamentals and radiometry*. Addison-Wesley publishing company. 456 p.

Annexe 1

Données de terrain et des sols.

Annexe 1. Tableau des données de terrain et des sols.

Sites	Description	Sable (1=100%)	Argile (1=100%)	Appellation des sols	Angle Inciden degré	RMS h (cm)	L. corré. (cm)
F1.1	90% couvert	0,26	0,26	Cr	68,52	3,3	1,13
F1.13	90% couvert	0,27	0,27	Cr	68,75	3,3	1,13
F1.15	90% couvert	0,22	0,31	Cr	68,96	3,3	1,13
F1.16	90% couvert	0,14	0,47	Cr	69,07	3,3	1,13
F1.17	90% couvert	0,30	0,24	Cr	69,18	3,3	1,13
F1.18	90% couvert	0,26	0,28	Cr	69,29	3,3	1,13
F1.19	100% couvert	0,29	0,20	Cr	69,39	3,3	1,13
F1.2	90% couvert	0,23	0,32	Cr	68,42	3,3	1,13
F1.20	100% couvert	0,25	0,22	Cr	69,50	3,3	1,13
F1.3	90% couvert	0,25	0,26	Cr	68,31	3,3	1,13
F1.4	90% couvert	0,24	0,29	Cr	68,22	3,3	1,13
F1.5	90% couvert	0,31	0,26	Cr	67,89	3,3	1,13
F1.6	90% couvert	0,36	0,22	Cr	67,80	3,3	1,13
F1.7	90% couvert	0,27	0,24	Cr	67,70	3,3	1,13
F1.8	90% couvert	0,32	0,19	Cr	67,59	3,3	1,13
F1.9	90% couvert	0,34	0,17	Cr	67,50	3,3	1,13
F2.1	100% couvert	0,36	0,24	(Ca+Cr)	65,59	3,3	1,13
F2.10	100% nu	0,31	0,16	(Ca+Cr)	67,83	3,3	1,13
F2.11	100% nu	0,33	0,19	(Ca+Cr)	68,07	3,3	1,13
F2.12	100% nu	0,30	0,19	CrI	68,44	3,3	1,13
F2.13	100% nu	0,28	0,19	CrI	68,22	3,3	1,13
F2.14	100% nu	0,29	0,19	CrI	68,01	3,3	1,13
F2.15	100% nu	0,32	0,17	(Ca+Cr)	67,80	3,3	1,13
F2.16	100% nu	0,28	0,19	(Ca+Cr)	67,58	3,3	1,13
F2.17	100% nu	0,30	0,19	(Ca+Cr)	67,36	3,3	1,13
F2.18	100% couvert	0,28	0,20	(Ca+Cr)	67,15	3,3	1,13
F2.19	100% couvert	0,28	0,18	Ca	66,94	3,3	1,13
F2.2	100% couvert	0,36	0,17	(Ca+Cr)	65,82	3,3	1,13
F2.20	100% couvert	0,28	0,17	Ca	66,73	3,3	1,13
F2.21	100% couvert	0,30	0,12	Ca	66,51	3,3	1,13
F2.22	100% couvert	0,36	0,15	Ca	66,37	3,3	1,13
F2.3	100% couvert	0,31	0,16	(Ca+Cr)	66,08	3,3	1,13
F2.4	100% couver	0,29	0,16	(Ca+Cr)	66,30	3,3	1,13
F2.5	100% nu	0,32	0,19	(Ca+Cr)	66,66	3,3	1,13
F2.6	100% nu	0,32	0,18	(Ca+Cr)	66,89	3,3	1,13
F2.7	100% nu	0,36	0,16	(Ca+Cr)	67,12	3,3	1,13
F2.8	100% nu	0,32	0,12	(Ca+Cr)	67,36	3,3	1,13
F2.9	100% nu	0,33	0,15	(Ca+Cr)	67,60	3,3	1,13
F3.1	90% couver	0,33	0,18	Ca	57,69	3,3	1,13
F3.10	100% nu	0,37	0,20	Ca	57,94	3,3	1,13
F3.11	100% nu	0,40	0,17	Ca	58,02	3,3	1,13
F3.12	100% nu	0,30	0,15	Ca	58,10	3,3	1,13
F3.13	90% nu	0,42	0,18	Ca	58,72	3,3	1,13
F3.14	90% nu	0,37	0,18	Cr	58,64	3,3	1,13

F3.15	40% nu	0,37	0,16	Cr	58,56	3,3	1,13
F3.16	100% couvert	0,41	0,16	Cr	58,47	3,3	1,13
F3.2	90% couvert	0,37	0,17	Ca	57,60	3,3	1,13
F3.3	100% couvert	0,37	0,16	Ca	57,52	3,3	1,13
F3.4	100% nu	0,38	0,16	Ca	57,44	3,3	1,13
F3.5	100% couvert	0,39	0,16	Ca	57,35	3,3	1,13
F3.6	100% couvert	0,44	0,14	Ca	57,27	3,3	1,13
F3.7	100% couvert	0,43	0,14	Cr	57,19	3,3	1,13
F3.8	100% nu	0,33	0,21	Ca	57,77	3,3	1,13
F3.9	100% nu	0,40	0,20	Ca	57,86	3,3	1,13
F4.1	100% nu	0,31	0,21	(Ca+Cr)	53,36	3,3	1,13
F4.2	100% nu	0,37	0,18	(Ca+Cr)	53,27	3,3	1,13
F4.3	100% nu	0,39	0,17	(Ca+Cr)	53,18	3,3	1,13
F4.4	100% nu	0,36	0,17	(Ca+Cr)	53,09	3,3	1,13
F4.5	100% nu	0,39	0,17	(Ca+Cr)	52,99	3,3	1,13
F4.6	70% nu	0,39	0,18	Cr	52,90	3,3	1,13
F4.7	70% nu	0,36	0,18	Cr	52,81	3,3	1,13
F5.1	10% couvert	0,42	0,17	Ca	49,49	3,3	1,13
F5.10	100% nu	0,45	0,15	Cr	47,49	3,3	1,13
F5.11	70% nu	0,41	0,16	Ca	47,67	3,3	1,13
F5.12	100% nu	0,44	0,15	Ca	47,83	3,3	1,13
F5.2	70% nu	0,44	0,14	Ca	49,26	3,3	1,13
F5.3	10% couvert	0,39	0,16	Ca	49,03	3,3	1,13
F5.4	70% nu	0,40	0,17	Ca	48,81	3,3	1,13
F5.5	10% couvert	0,36	0,18	Ca	48,58	3,3	1,13
F5.6	10% couvert	0,38	0,17	Ca	48,35	3,3	1,13
F5.7	30% couvert	0,35	0,20	Cr	47,00	3,3	1,13
F5.8	70% nu	0,37	0,18	Cr	47,17	3,3	1,13
F5.9	30% couvert	0,39	0,17	Cr	47,33	3,3	1,13
F6.1	50% couvert	0,40	0,16	Ca	48,29	3,3	1,13
F6.2	70% nu	0,46	0,16	Ca	48,20	3,3	1,13
F6.3	100%nu	0,36	0,18	Ca	48,11	3,3	1,13
F6.4	100% nu	0,42	0,18	Ca	48,03	3,3	1,13
F6.5	100% nu	0,37	0,17	Ca	47,93	3,3	1,13
F7.1	100% nu	0,33	0,22	Ca	46,50	3,3	1,13
F7.10	100% nu	0,38	0,18	Ca	48,01	3,3	1,13
F7.2	100% nu	0,34	0,22	Ca	46,67	3,3	1,13
F7.3	100% nu	0,32	0,17	Ca	46,84	3,3	1,13
F7.4	100% nu	0,39	0,17	Ca	47,00	3,3	1,13
F7.5	100% nu	0,39	0,18	Ca	47,17	3,3	1,13
F7.6	100% nu	0,37	0,16	Ca	47,34	3,3	1,13
F7.7	100% nu	0,41	0,17	Ca	47,32	3,3	1,13
F7.8	100% nu	0,39	0,17	Ca	47,68	3,3	1,13
F7.9	100% nu	0,39	0,19	Ca	47,84	3,3	1,13

Cr = Sol de nom Carleton

Ca = Sol de nom Caribou

Annexe 2

Données de laboratoire

Annexe 2. Tableau des données de laboratoire

Sites	% MvH2O 5 cm	MvH2O 5 cm	Er (Hallika.)	NG2 (11x11)	NG2(dB) (11x11)
F1.1	52,28	0,52	37,53	1929,00	32,85
F1.13	55,91	0,56	42,28	2610,94	34,17
F1.15	60,85	0,61	49,23	1414,53	31,51
F1.16	57,06	0,57	43,82	2113,32	33,25
F1.17	49,76	0,50	34,41	2540,58	34,05
F1.18	62,44	0,62	51,60	2369,80	33,75
F1.19	30,28	0,30	15,25	1830,41	32,63
F1.2	42,29	0,42	26,01	1651,06	32,18
F1.20	55,89	0,56	42,26	2893,82	34,61
F1.3	55,11	0,55	41,21	2039,67	33,10
F1.4	70,1	0,70	63,79	7280,46	38,62
F1.5	42,41	0,42	26,15	2356,44	33,72
F1.6	46,56	0,47	30,67	1796,16	32,54
F1.7	45,36	0,45	29,31	3167,47	35,01
F1.8	41,69	0,42	25,41	3048,88	34,84
F1.9	35,18	0,35	19,24	2348,87	33,71
F2.1	25,11	0,25	11,64	3768,60	35,76
F2.10	18,55	0,19	7,95	309,32	24,90
F2.11	23,89	0,24	10,88	5030,65	37,02
F2.12	32,83	0,33	17,26	4473,24	36,51
F2.13	21,75	0,22	9,62	2819,53	34,50
F2.14	21,54	0,22	9,50	3215,60	35,07
F2.15	25,54	0,26	11,91	4021,62	36,04
F2.16	25,25	0,25	11,72	1616,69	32,09
F2.17	22,66	0,23	10,14	381,50	25,81
F2.18	28,68	0,29	14,06	4614,29	36,64
F2.19	28,57	0,29	13,98	2948,36	34,70
F2.2	27,33	0,27	13,11	3734,95	35,72
F2.20	30	0,30	15,03	3480,46	35,42
F2.21	29,09	0,29	14,36	3295,43	35,18
F2.22	24,45	0,24	11,22	3666,49	35,64
F2.3	26,38	0,26	12,47	3837,27	35,84
F2.4	26,9	0,27	12,82	3476,22	35,41
F2.5	19,52	0,20	8,43	1676,73	32,24
F2.6	21,96	0,22	9,74	313,11	24,96
F2.7	27,95	0,28	13,55	375,09	25,74
F2.8	28,99	0,29	14,29	262,41	24,19
F2.9	24,97	0,25	11,55	354,07	25,49
F3.1	30	0,30	15,04	3862,98	35,87
F3.10	18,05	0,18	7,71	1614,56	32,08
F3.11	22,64	0,23	10,14	1594,90	32,03
F3.12	25,63	0,26	11,97	2467,78	33,92
F3.13	17,74	0,18	7,57	804,01	29,05
F3.14	17,04	0,17	7,24	857,36	29,33

F3.15	21,17	0,21	9,30	1133,64	30,54
F3.16	16,57	0,17	7,03	3839,55	35,84
F3.2	26,76	0,27	12,73	3179,15	35,02
F3.3	26,6	0,27	12,62	3209,17	35,06
F3.4	24,81	0,25	11,45	3403,25	35,32
F3.5	22,77	0,23	10,21	3254,41	35,12
F3.6	20,53	0,21	8,96	4095,07	36,12
F3.7	25,84	0,26	12,12	2056,17	33,13
F3.8	21,64	0,22	9,56	1407,10	31,48
F3.9	17,34	0,17	7,38	1763,95	32,46
F4.1	20,21	0,20	8,79	811,74	29,09
F4.2	18,82	0,19	8,08	536,66	27,30
F4.3	16,94	0,17	7,20	773,66	28,89
F4.4	22,09	0,22	9,82	708,14	28,50
F4.5	18,04	0,18	7,71	2357,74	33,72
F4.6	21,68	0,22	9,59	2358,63	33,73
F4.7	23,85	0,24	10,85	2258,24	33,54
F5.1	20,18	0,20	8,78	1917,74	32,83
F5.10	18,85	0,19	8,10	2241,57	33,51
F5.11	14,88	0,15	6,32	2728,92	34,36
F5.12	17,72	0,18	7,56	3384,83	35,30
F5.2	20,35	0,20	8,87	1946,07	32,89
F5.3	20,4	0,20	8,89	1711,84	32,33
F5.4	20,73	0,21	9,07	1344,82	31,29
F5.5	19,86	0,20	8,61	1661,74	32,21
F5.6	19,17	0,19	8,26	2471,42	33,93
F5.7	23,11	0,23	10,41	1571,46	31,96
F5.8	21,77	0,22	9,64	1905,84	32,80
F5.9	17,95	0,18	7,66	1357,61	31,33
F6.1	20,22	0,20	8,80	1546,62	31,89
F6.2	22,7	0,23	10,17	1637,19	32,14
F6.3	24,11	0,24	11,01	3285,37	35,17
F6.4	20,83	0,21	9,12	3257,26	35,13
F6.5	23,09	0,23	10,40	3591,75	35,55
F7.1	18,63	0,19	7,99	1483,07	31,71
F7.10	18,91	0,19	8,13	1556,26	31,92
F7.2	18,52	0,19	7,93	2720,31	34,35
F7.3	22	0,22	9,76	2331,93	33,68
F7.4	19,83	0,20	8,59	2049,00	33,12
F7.5	16,09	0,16	6,83	1771,43	32,48
F7.6	20,53	0,21	8,96	1380,66	31,40
F7.7	18,92	0,19	8,13	1304,64	31,15
F7.8	17,23	0,17	7,33	1756,47	32,45
F7.9	18,2	0,18	7,78	1945,14	32,89

Annexe 3

Données TDR

Annexe 3. Tableau des données TDR

SITES	Er Hall	L	Zf (ohm)	Ea'	1(rho)	2(Vf/Vo)	3 (theta 1)	4 (Tan)	5(Ea')	6(Theta 2)	7(Ea'')	8(Er) TDR
F1.2	35,41	2,48	766,00	13,40	-0,56	1,87	0,01	0,06	13,39	0,08	-4,20	14,04
F1.3	38,95	2,56	766,50	19,89	-0,68	1,87	0,01	0,04	19,89	0,08	-4,21	20,33
F2.11	10,02	2,39	214,15	7,62	-0,34	1,60	0,05	0,39	7,48	0,07	-1,07	7,69
F2.5	7,73	2,35	193,40	5,57	-0,19	1,57	0,06	0,60	5,35	0,07	-0,60	5,60
F2.8	13,22	2,33	193,40	4,67	-0,11	1,57	0,06	0,72	4,42	0,07	-0,59	4,70
F3.1	14,01	2,40	624,46	8,18	-0,37	1,84	0,02	0,12	8,16	0,08	-3,92	9,07
F3.10	7,12	2,37	624,37	6,45	-0,26	1,84	0,02	0,16	6,43	0,08	-3,92	7,55
F3.11	9,40	2,36	618,36	6,05	-0,23	1,84	0,02	0,17	6,03	0,08	-3,90	7,20
F3.12	11,01	2,37	624,37	6,35	-0,25	1,84	0,02	0,16	6,33	0,08	-3,92	7,46
F3.13	7,03	2,40	624,40	8,07	-0,36	1,84	0,02	0,13	8,05	0,08	-3,92	8,97
F3.14	6,68	2,37	624,37	6,40	-0,26	1,84	0,02	0,16	6,38	0,08	-3,92	7,50
F3.15	8,59	2,37	624,34	6,55	-0,27	1,84	0,02	0,16	6,53	0,08	-3,92	7,63
F3.16	6,52	2,39	624,00	7,62	-0,34	1,84	0,02	0,13	7,60	0,08	-3,92	8,57
F3.2	11,81	2,42	624,00	9,36	-0,43	1,84	0,02	0,11	9,35	0,08	-3,92	10,15
F3.3	11,71	2,37	624,35	6,35	-0,25	1,84	0,02	0,16	6,33	0,08	-3,92	7,46
F3.4	10,62	2,41	624,41	8,76	-0,40	1,84	0,02	0,12	8,75	0,08	-3,92	9,60
F3.5	9,47	2,38	624,38	6,97	-0,30	1,84	0,02	0,15	6,95	0,08	-3,92	7,99
F3.6	8,34	2,38	624,38	7,08	-0,30	1,84	0,02	0,14	7,06	0,08	-3,92	8,09
F3.7	11,32	2,37	624,37	6,55	-0,27	1,84	0,02	0,16	6,53	0,08	-3,92	7,63
F3.8	8,79	2,47	624,47	12,67	-0,54	1,84	0,02	0,08	12,66	0,08	-3,92	13,27
F3.9	6,83	2,36	624,36	6,05	-0,23	1,84	0,02	0,17	6,03	0,08	-3,92	7,21
F4.1	8,06	2,34	520,00	5,20	-0,16	1,82	0,02	0,24	5,16	0,08	-3,61	6,33
F4.2	7,46	2,36	520,00	6,05	-0,23	1,82	0,02	0,20	6,02	0,08	-3,61	7,04
F4.3	6,65	2,35	624,35	5,57	-0,19	1,84	0,02	0,18	5,55	0,08	-3,92	6,81
F4.4	9,07	2,33	624,33	4,67	-0,11	1,84	0,02	0,22	4,64	0,08	-3,92	6,09
F4.5	7,12	2,36	624,36	6,05	-0,23	1,84	0,02	0,17	6,03	0,08	-3,92	7,21
F4.6	8,88	2,37	624,37	6,55	-0,27	1,84	0,02	0,16	6,53	0,08	-3,92	7,63
F4.7	10,03	2,36	624,00	6,15	-0,24	1,84	0,02	0,17	6,13	0,08	-3,92	7,29

F5.1	8,16	2,36	1000,00	5,81	-0,21	1,90	0,01	0,11	5,80	0,09	-4,50	7,35
F5.11	5,87	2,38	1000,00	7,08	-0,30	1,90	0,01	0,09	7,07	0,09	-4,50	8,39
F5.3	8,22	2,37	1000,00	6,55	-0,27	1,90	0,01	0,10	6,55	0,09	-4,50	7,95
F5.5	7,94	2,31	1000,00	3,84	-0,01	1,90	0,01	0,17	3,83	0,09	-4,50	5,92
F5.7	9,60	2,36	1000,00	6,05	-0,23	1,90	0,01	0,11	6,04	0,09	-4,50	7,54
F5.9	7,09	2,37	1000,00	6,76	-0,28	1,90	0,01	0,09	6,75	0,09	-4,50	8,12
F6.1	8,15	2,36	452,00	5,86	-0,22	1,79	0,02	0,24	5,81	0,08	-3,33	6,74
F6.4	8,48	2,36	452,00	6,15	-0,24	1,79	0,02	0,23	6,11	0,08	-3,33	6,99
F6.5	9,62	2,44	452,80	10,63	-0,48	1,79	0,02	0,13	10,60	0,08	-3,34	11,14
F7.1	7,34	2,34	585,00	5,20	-0,16	1,83	0,02	0,21	5,17	0,08	-3,81	6,45
F7.3	8,97	2,33	570,50	4,84	-0,12	1,83	0,02	0,23	4,81	0,08	-3,77	6,13
F7.5	6,31	2,34	570,00	5,11	-0,15	1,83	0,02	0,22	5,08	0,08	-3,77	6,35
F7.7	7,54	2,37	570,00	6,45	-0,26	1,83	0,02	0,17	6,43	0,08	-3,77	7,47
F7.9	7,20	2,32	570,00	4,24	-0,06	1,83	0,02	0,26	4,21	0,08	-3,77	5,67

Appareil du type "cable tester" de Tektronix

Constantes à l'entrée :

Profondeur des mesures in situ = 5 cm

l Longueur des tiges = 10 cm

Lo Point zéro, lecture du CT au début des tiges = 2.114

Zo Impédance caractéristique des tiges = 200 ohm

Zi Impédance de l'instrument = 53 ohm

Variables à l'entrée :

Zf (mesurée) Impédance caractéristique des tiges après réflexion dans le milieu

L (mesurée) Lecture du *cable tester* (CT)

Annexe 4
Coordonnées UTM des points
d'échantillonnage des sols

Annexe 4. Tableau des coordonnées UTM des points d'échantillonnage des sols.

SITES	UTM (Nord)	UTM (Est)
F1.1	5 114 817	613 065
F1.2	5 114 846	613 162
F1.3	5 114 876	613 258
F1.4	5 114 903	613 353
F1.5	5 114 994	613 650
F1.6	5 115 019	613 736
F1.7	5 115 049	613 833
F1.8	5 115 078	613 926
F1.9	5 115 105	614 022
F1.10	5 115 133	614 109
F1.11	5 115 157	614 189
F1.12	5 114 785	614 082
F1.13	5 114 753	613 985
F1.14	5 114 723	613 889
F1.15	5 114 693	613 796
F1.16	5 114 663	613 700
F1.17	5 114 633	613 606
F1.18	5 114 602	613 510
F1.19	5 114 572	613 413
F1.20	5 114 542	613 320
F2.1	5 115 641	608 892
F2.2	5 115 575	608 816
F2.3	5 115 502	608 734
F2.4	5 115 441	608 663
F2.5	5 115 340	608 545
F2.6	5 115 274	608 470
F2.7	5 115 210	608 395
F2.8	5 115 142	608 317
F2.9	5 115 077	608 244
F2.10	5 115 010	608 167
F2.11	5 114 945	608 094
F2.12	5 114 839	608 396
F2.13	5 114 901	608 476
F2.14	5 114 961	608 554
F2.15	5 115 019	608 633
F2.16	5 115 081	608 716
F2.17	5 115 143	608 797
F2.18	5 115 202	608 875
F2.19	5 115 262	608 956
F2.20	5 115 321	609 035
F2.21	5 115 381	609 114

F2.22	5 115 421	609 168
F3.1	5 117 861	606 034
F3.2	5 117 885	606 133
F3.3	5 117 908	606 230
F3.4	5 117 931	606 328
F3.5	5 117 955	606 425
F3.6	5 117 978	606 522
F3.7	5 118 002	606 619
F3.8	5 117 837	606 626
F3.9	5 117 814	606 529
F3.10	5 117 790	606 432
F3.11	5 117 767	606 335
F3.12	5 117 744	606 238
F3.13	5 117 571	606 374
F3.14	5 117 594	606 472
F3.15	5 117 617	606 571
F3.16	5 117 641	606 667
F4.1	5 119 077	606 894
F4.2	5 119 102	606 800
F4.3	5 119 127	606 705
F4.4	5 119 154	606 605
F4.5	5 119 180	606 511
F4.6	5 119 207	606 414
F4.7	5 119 231	606 319
F5.1	5 120 166	607 025
F5.2	5 120 230	606 947
F5.3	5 120 294	606 872
F5.4	5 120 356	606 794
F5.5	5 120 420	606 718
F5.6	5 120 485	606 639
F5.7	5 120 864	606 603
F5.8	5 120 818	606 691
F5.9	5 120 771	606 780
F5.10	5 120 727	606 867
F5.11	5 120 677	606 956
F5.12	5 120 631	607 043
F6.1	5 120 501	607 164
F6.2	5 120 526	607 260
F6.3	5 120 552	607 358
F6.4	5 120 576	607 452
F6.5	5 120 602	607 549
F7.1	5 121 005	605 638
F7.2	5 120 958	605 547
F7.3	5 120 909	605 458
F7.4	5 120 864	605 371
F7.5	5 120 816	605 281
F7.6	5 120 768	605 193

F7.7	5 120 775	605 080
F7.8	5 120 674	605 019
F7.9	5 120 629	604 929
F7.10	5 120 582	604 840
